

Titre: Conception et mise en place de l'instrumentation nécessaire à la
comparaison entre la position à l'outil et la position à l'encodeur de
l'outil d'une machine-outil à commande numérique 5-axes

Auteur: Hassen Ben Yakhlef
Author:

Date: 2018

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ben Yakhlef, H. (2018). Conception et mise en place de l'instrumentation
nécessaire à la comparaison entre la position à l'outil et la position à l'encodeur
de l'outil d'une machine-outil à commande numérique 5-axes [Master's thesis,
École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/3674/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3674/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** René Mayer, & Sylvain Lavernhe
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET MISE EN PLACE DE L'INSTRUMENTATION NÉCESSAIRE À LA
COMPARAISON ENTRE LA POSITION À L'OUTIL ET LA POSITION À L'ENCODEUR
DE L'OUTIL D'UNE MACHINE-OUTIL À COMMANDE NUMÉRIQUE 5-AXES

HASSEN BEN YAKHLEF

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

OCTOBRE 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION ET MISE EN PLACE DE L'INSTRUMENTATION NÉCESSAIRE À LA
COMPARAISON ENTRE LA POSITION À L'OUTIL ET LA POSITION À L'ENCODEUR
DE L'OUTIL D'UNE MACHINE-OUTIL À COMMANDE NUMÉRIQUE 5-AXES

présenté par : BEN YAKHLEF Hassen

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BALAZINSKI Marek, Docteur ès sciences, président

M. MAYER René, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. LAVERNHE Sylvain, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. KHAMENEIFAR Farbod, Ph. D., membre

DÉDICACE

A mes chers parents, à mes chers grands-parents

*Pour toutes les peines endurées, tous les sacrifices consentis, pour leurs efforts,
pour leur grande contribution à ma réussite. Que dieu les préserve et leur
accorde santé et longue vie.*

A ma famille

*Avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les
sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures
conditions*

A mes Amis

Je dédie ce projet de fin d'études

Hassen BEN YAKHLEF

REMERCIEMENTS

C'est avec grand plaisir que je réserve cette page en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont apporté collaboration et soutien durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur René Mayer mon directeur de recherche pour sa patience, sa disponibilité, son suivi et son enseignement de qualité durant toute la période de ma maîtrise.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Sylvain Lavernhe, mon codirecteur de recherche pour son soutien et ses conseils judicieux.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Guy Gironne et Vincent Mayer les techniciens du laboratoire de recherche en fabrication virtuelle, pour leur disponibilité, leur collaboration et leur soutien pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

RÉSUMÉ

Ce mémoire concerne la conception, la mise en place et l'utilisation de l'instrumentation permettant de comparer la position, vue par l'encodeur, de l'outil d'une machine-outil à commande numérique cinq axes à sa position réelle et ce en régime dynamique.

La solution proposée consiste à acquérir la position réelle de l'outil mesurée par un interféromètre laser et celle mesurée par l'encodeur simultanément et en régime dynamique. Les mesures sont acquises grâce à un système d'acquisition conçu et mis en place permettant le suivi en temps réel et l'enregistrement des données lors de chaque test en assurant une synchronisation à un quart de cycle près entre les deux mesures. Cet écart de synchronisation se manifeste par une erreur spatiale de 0.5 μm pour l'encodeur et de 0.79 nm pour le laser.

Cette solution basée sur des mesures en dynamique permet de réduire la durée de l'opération d'étalonnage et par conséquent de réduire les coûts d'arrêt machine, sans oublier qu'elle permet d'avoir des mesures de meilleure qualité et plus représentatives que la machine est en mouvement lors de la prise de ces mesures. Ceci est confirmé par les résultats obtenus montrant les traits et les aspects du comportement dynamique de la machine qui s'accroissent en augmentant la vitesse d'avance et qui sont impossibles à détecter par des opérations de mesures quasi-statiques lors d'un étalonnage conventionnel.

Cette solution constitue un premier pas vers une modélisation complète du comportement dynamique de la machine.

ABSTRACT

This thesis is about the design, implementation and use of the instrumentation allowing to compare the position, seen by the encoder, of the tool of a five-axis CNC machine tool with its actual position, in dynamic mode.

The proposed solution is to acquire the actual position of the tool measured by a laser interferometer and the one measured by the encoder simultaneously and in dynamic mode. Measurements are acquired via a designed and implemented acquisition system that allow real-time monitoring and saving of data during each test ensuring a synchronization of a quarter-cycle between the two measurements. This synchronization gap is shown by a spatial error of 0.5 μm for the encoder and 0.79 nm for the laser.

This solution based on dynamic measurements reduces the duration of the calibration and therefore reduces machine downtime costs. It also allows better and more representative measurements especially that the machine is in motion during the acquisition. This is confirmed by the results obtained showing the aspects of the dynamic behavior of the machine which are accentuated when increasing the feedrate and which are impossible to detect via a simple quasi-static measurement operation during a conventional calibration.

This solution is a first step towards a complete modeling of the dynamic behavior of the machine.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES.....	XIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
CHAPITRE 3 ARCHITECTURE	9
CHAPITRE 4 CHOIX DES INSTRUMENTS.....	12
4.1 La Machine-Outil à Commande numérique (MOCN)	12
4.2 Encodeur Machine et Interfaces Électroniques IBV	13
4.3 Le choix du capteur : L'interféromètre [31].....	16
4.4 Le Matériel d'acquisition	19
CHAPITRE 5 LA SYNCHRONISATION.....	22
5.1 Architecture.....	22
5.2 Choix des instruments	23
5.3 Mode opératoire	23
5.4 Mise en place.....	25

CHAPITRE 6	CONCEPTION ET RÉALISATION DU PROGRAMME DE PRISE DES MESURES.....	27
6.1	Labview	27
6.2	Programme d'acquisition	28
6.2.1	Besoins	28
6.2.2	Conception et réalisation d'une première version du programme	29
6.2.3	Réalisation des tests de vérification	30
6.2.4	Les techniques de synchronisation utilisées	31
6.2.5	La version finale du programme	34
6.2.6	Analyse des résultats de tests réalisés avec certaines versions du programme	34
CHAPITRE 7	RÉALISATION DES TESTS ET ANALYSE DES RÉSULTATS	40
7.1	Confirmation de la synchronisation avec l'interféromètre.....	40
7.2	Mise en place.....	43
7.3	Confirmation de l'exactitude de nos mesures	45
7.4	Les tests de comparaison.....	48
7.4.1	Réalisation des tests	48
7.4.2	Observation des résultats.....	49
CHAPITRE 8	CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE		55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Besoins pour un matériel d'acquisition adéquat	19
Tableau 7.1 : Résultats d'un test de confirmation réalisé à une vitesse de 10000 mm/min	46
Tableau 8.1 : Classement des bus de communication selon NI [42].....	63
Tableau 8.2: Avantages et inconvénients de chaque catégorie de Matériels d'acquisitions disponibles.....	65
Tableau 8.3 : Étude comparative des générateurs de tensions considérés	67

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Système d'acquisition de données dans le cas général.....	10
Figure 3.2 : L'architecture de notre système d'acquisition	11
Figure 4.1 : Architecture de la MOCN Huron KX8 Five [28]	12
Figure 4.2 : Interface électronique IBV vue de l'extérieur	14
Figure 4.3 : entrées/sorties des IBV	14
Figure 4.4 : boucle d'asservissement de position de la MOCN	15
Figure 4.5 : Représentation simplifiée de l'installation de l'interféromètre pour la mesure de la position sur un axe linéaire.....	18
Figure 4.6 : Matériel d'acquisition utilisé.....	21
Figure 4.7 : codage X1, X2 et X4 des compteurs encodeurs du châssis NI9174 [36]	21
Figure 5.1: Schéma du banc d'essai conçu pour la synchronisation.....	22
Figure 5.2 : Processus appliqué pour atteindre la synchronisation	24
Figure 5.3 : Duplication des signaux de l'une des chaines du générateur de tension.....	25
Figure 5.4 : Adaptateur DSUB25 Bornier a vis	26
Figure 5.5 : Image réelle du dispositif d'essai mis en place	26
Figure 6.1 : Chemin parcouru par les données.....	30
Figure 6.2 : fréquences d'échantillonnage dépendantes d'un signal d'horloge	32
Figure 6.3 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test avec la version initiale du programme	36
Figure 6.4 : Différences entre les comptes pour un test avec la version initiale du programme....	36
Figure 6.5 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test avec une version intermédiaire 1 du programme	36

Figure 6.6 : Différences entre les comptes pour un test avec une version intermédiaire 1 du programme	36
Figure 6.7 : Différences entre les comptes pour un test avec une version intermédiaire 2 du programme	37
Figure 6.8 : Différences entre les comptes pour un test avec une version finale du programme...	38
Figure 6.9 : schéma bloc simplifié de la version finale du programme	39
Figure 7.1 : Installation de l'interféromètre sur la machine.....	41
Figure 7.2 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test de confirmation de synchronisation avec interféromètre	42
Figure 7.3 : Différences entre les comptes pour un test de confirmation de synchronisation avec interféromètre	42
Figure 7.4 : Système d'acquisition complet.....	43
Figure 7.5 : Boitier d'adaptation de câbles	44
Figure 7.6 : Évolution des acquisitions du matériel NI au cours du temps.....	45
Figure 7.7 : différence entre erreur NI et erreur Renishaw en fonction de la consigne	47
Figure 7.8 : courbes d'évolution des mesures avec interféromètre et encodeur pour un test dynamique	49
Figure 7.9 : Évolution de l'erreur de la machine au cours du temps en régime dynamique et quasi-statique	50
Figure 7.10 : zone de zoom	51
Figure 7.11 : Effet de la vitesse sur le comportement dynamique de machine pour un mouvement sur l'axe Y	52

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

MOCN	Machine-outil à commande numérique
CMM	Coordinate measuring machine
NI	National instruments
RAM	Random access memory
E/S	Entrées/Sorties

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Fiche technique des interfaces electroniques IBV 6172[41]	58
Annexe B – Etude pour definir les besoins pour le materiel d’acquisition necessaire	59
Annexe C – Etude comparative des categories de materiels d’acquisition de NI.....	64
Annexe D - Etudes comparatives pour achat de generateur de tensions.....	66
Annexe E – Brochage des compteurs de notre matériel d'acquisition[46].....	68
Annexe F - Premiere version du programme d’acquisition	69
Annexe G - Premiere version de l’interface de supervision.....	70
Annexe H - Version finale du programme d’acquisition	71
Annexe I - Version finale de l’interface de supervision.....	72
Annexe J - Exemple d’un fichier resultat obtenu avec la version finale du programme d’acquisition	73
Annexe K – Exemple d’un fichier résultat non synchronisé.....	74
Annexe L – Résultats des tests de confirmation de l’exactitude de nos mesures	75

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Pour les métaux, l'usinage demeure l'une des techniques les plus utilisées et les plus importantes pour la fabrication partout dans le monde [1]. Les Machines-outils à commande numérique sont des systèmes mécaniques automatisés permettant, grâce à un programme, d'enlever de la matière par coupe des matériaux (métaux en général) pour obtenir la forme désirée grâce au mouvement de l'outil et/ou de la pièce brute [2]. En général, une machine-outil à commande numérique a une structure composée de plusieurs éléments liés entre eux de façon à former une chaîne fermée. Le point critique dans cette chaîne est la connexion entre la surface de la pièce à usiner et l'outil. Ceci signifie que toute erreur de position entre l'outil et la surface de la pièce brute engendrera des imperfections sur la pièce finale usinée [3]. Les machines-outils à commandes numériques peuvent être classées selon le nombre d'axes commandés. Celles qui nous intéressent sont les machines à cinq axes avec trois axes de translation et deux axes de rotation. Ces machines ont de meilleures caractéristiques comparées aux machines conventionnelles à trois axes de translation uniquement. En effet, elles permettent l'usinage des pièces à profondes cavités et de formes complexes sans avoir à changer de gabarit ou de montage de la pièce. D'un autre côté, la précision d'usinage des machines-outils à cinq axes est généralement inférieure à celle de leurs prédécesseurs à cause des deux axes de rotation qui engendrent diverses erreurs supplémentaires [4]. Si on trouve une solution efficace pour corriger ou compenser ces erreurs, les performances d'usinages avec ces machines seront considérablement améliorées [5]. Aujourd'hui, l'enjeu majeur consiste à produire des pièces dans les tolérances de dimension et de forme imposées qui s'avèrent de plus en plus serrées dans certains domaines. Pour fabriquer conformément à ces exigences il est impératif de diminuer au minimum les erreurs dues à la machine, voire même les éliminer si possible. Surtout que ces erreurs de la machine se répercutent directement sur la qualité de la pièce usinée, puisque, toute erreur affectant la position ou l'orientation de la broche par rapport à la pièce brute, provoquera une erreur dimensionnelle ou géométrique sur la pièce finale usinée [6]. Diverses erreurs peuvent affecter la machine-outil. Pour pouvoir neutraliser convenablement ces erreurs, il est indispensable de bien les mesurer. Le processus visant à déterminer les erreurs d'une machine-outil puis de les corriger s'appelle étalonnage des machines. L'étalonnage doit être effectué régulièrement. Ce qui représente une contrainte considérable pour les industriels car le temps requis pour un étalonnage complet d'une machine peut prendre des heures voire même des jours. Ceci engendrerait des coûts

énormes vu que la machine est à l'arrêt pendant tout ce temps. D'un autre côté, cet étalonnage est conventionnellement basé sur des mesures quasi-statiques qui ne sont pas toujours représentatives du fonctionnement normal de la machine et qui pourraient négliger certains effets à cause d'un nombre de mesures qui n'est pas assez élevé pour couvrir tout le volume de fonctionnement de la machine et pour donner une information complète des erreurs. De ce fait, ce mémoire présente une solution permettant de palier à ce problème par la mise en place d'une solution permettant de réaliser un étalonnage de la machine outils cinq axes en veillant à réduire le temps requis et à prendre des mesures aptes à mettre en évidence les erreurs présentes pendant un fonctionnement normal de la machine.

Ce travail est effectué dans le cadre d'une maîtrise de recherche en génie Mécanique sous la supervision du Professeur René Mayer au sein du Laboratoire de Recherche en Fabrication Virtuelle (LRFV) de l'école polytechnique de Montréal. Ce travail a pour objectif de concevoir et mettre en place l'instrumentation nécessaire à la comparaison entre la position à l'outil et la position à l'encodeur de l'outil d'une machine-outil à commande numérique (MOCN) cinq axes en vue de mettre en évidence l'erreur qui touche cette machine. Nous disposons de la MOCN cinq axes « Huron KX8-Five » que nous cherchons à inspecter en vue de déterminer l'erreur de position de l'outil afin de la corriger. Pour atteindre les objectifs fixés, le mémoire débute par une revue de littérature qui permet de faire le point sur les travaux réalisés précédemment dans le domaine. Ceci constitue un point de départ pour le travail. Dans un deuxième temps, l'architecture du système conçu est présentée. Par la suite, une conception de l'instrumentation adéquate est détaillée, suivie de la synchronisation des mesures. L'étape suivante, est la conception et la réalisation du programme permettant l'acquisition des données ainsi qu'une interface de supervision et de commande. Finalement, grâce au système mis en place, les tests sont effectués et les mesures prises sont traitées puis analysées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les MOCN sont très utilisées dans plusieurs domaines divers et variés de la production. Elles occupent une place importante dans les industries de fabrication. Dans certains domaines, Les industriel doivent produire en se conformant à des tolérances de plus en plus serrées surtout dans certains domaines où la précision est critique tel que les industries aérospace ou médicale [7]. Par conséquent, il est indispensable de réaliser un étalonnage convenable de la machine, ce qui permet d'estimer et de mesurer avec exactitude les erreurs qui touchent la machine en vue de les corriger [8].

Les erreurs touchant les MOCN peuvent avoir plusieurs sources qui sont classées selon cinq catégories : Les sources cinématiques, les sources thermo mécaniques, les charges, les forces dynamiques et le contrôle de mouvement (logiciel) [9]. En pratique, c'est l'existence de ces sources d'erreurs et leurs interactions qui affectent le comportement de la machine et la qualité des pièces usinées [10]. Ils sont à l'origine des erreurs volumétriques touchant la machine et qui sont définies par l'écart de position de l'outil par rapport à la pièce à usiner. Elle résulte de la combinaison d'un ensemble d'erreurs géométriques classées en deux catégories :

- * Les erreurs intra axes (appelées aussi écarts cinématiques articulaires) qui représentent les écarts de position et d'orientation du mouvement articulaire [11]. Pour un mouvement linéaire nominal, les erreurs intra axes sont : l'erreur de positionnement, deux erreurs de rectitude, et trois erreurs angulaires (roulis, tangage et lacet). De même pour un mouvement de rotation nominal six erreurs intra axes existent : deux erreurs de mouvement radiales, une erreur de mouvement axiale, l'erreur de position angulaire et deux erreurs d'inclinaison de mouvement.

- * Les erreurs inter axes (appelées aussi écarts géométriques de membrure) : sont les erreurs de position ou d'orientation d'un axe par rapport à un axe précédent. Généralement, elles sont causées par un défauts de structure ou d'assemblage de la machine [12].

L'étalonnage des MOCN nécessite la mesure ou la détermination de tous les composants de l'erreur volumétrique avec exactitude pour pouvoir, par la suite, les neutraliser par compensation numérique programmée au contrôleur de la machine ou en apportant les réparations mécaniques nécessaires aux éléments de la machine à l'origine de ces erreurs. Sachant que le nombre des erreurs géométriques s'élève à 21 pour une MOCN 3-axes (6 erreurs intra axes pour chacun des trois axes et trois erreurs inter axes) et 38 pour une MOCN 5-axes (6 erreurs intra axes pour chacun des cinq

axes et 8 erreurs inter axes), cet étalonnage pourrait s'avérer contraignant. L'étalonnage reconnu par la norme ISO230-2 est appelé étalonnage quasi-statique [13]. Cette technique consiste à commander le mouvement de l'outil, le long de l'axe de mouvement, d'une position à une autre en s'arrêtant à chaque position pendant une durée de temps pour pouvoir prélever la mesure avec un instrument de mesure adapté. Le nombre de positions cibles choisies influe directement sur la qualité des résultats des mesures. Même si la norme ISO230-2 impose un minimum de cinq cibles par mètre pour un axe de deux mètres, cela pourrait s'avérer insuffisant dans certains cas et pourrait engendrer un problème de sous échantillonnage (aliasing). Donc, pour avoir des mesurages de bonne qualité, il faut augmenter le nombre de cible. Or, cela impliquerait une durée plus élevée du processus. Par conséquent, un compromis doit être trouvé entre la durée et la qualité des mesurages lors de la planification d'un tel étalonnage. Ainsi, ce processus est assez contraignant en termes de ressources et de temps alloués sans oublier son coût élevé vu que la machine serait à l'arrêt durant tout ce temps surtout s'il doit être effectué pour chaque erreur géométrique et pour tous les axes de mouvement. Ainsi, il est primordial de minimiser le temps et les ressources nécessaires à l'étalonnage des MOCN.

Plusieurs études de recherches se sont penchées sur le sujet et certains ont réussi à élaborer des solutions prometteuses dont une approche basée sur la mesure de déplacement (Displacement measurement approach for machine geometric error assesment) [14] présentée par G. Chen et al. et permettant de simplifier le processus de mesure et de réduire sa durée en mesurant uniquement les erreurs de positionnement selon 15 lignes puis en déterminant à partir de ces mesures les 21 composantes de l'erreur volumétrique pouvant toucher une MOCN 3-axes. Or cette méthode est basée sur des mesures quasi-statiques donc le compromis entre la qualité et la durée est encore nécessaire sans oublier que cette méthode est prouvée valable pour une machine à 3 -axes et elle ne l'est pas forcément pour une autre à 5 -axes.

Les efforts d'autres chercheurs ont été dirigés dans le même sens. Tel est le cas de J. S. Chen et al. qui ont eu l'idée de mesurer le déplacement linéaire sur plusieurs lignes en vue de déduire les composantes de l'erreur géométrique [8]. Cette technique utilise un interféromètre laser à auto-alignement et repose sur les mesures prises sur 22 lignes différentes pour pouvoir déterminer les 21 composantes de l'erreur géométrique d'une machine-outil à 3 -axes. Bien que le nombre de lignes considérées soit plus élevé que pour la technique précédente [14] qui prend en compte

uniquement 15 lignes, celle-ci repose sur le concept d'auto alignement de l'interféromètre laser utilisé. Ceci réduit considérablement le temps de mise en place et de la prise des mesures comparé à l'interféromètre conventionnel qui requiert un alignement précis entre l'interféromètre et le mouvement mécanique du retroréfecteur ce qui nécessite une mise en place minutieuse et par conséquent plus longue et plus laborieuse. Une fois les mesures prises, les composantes de l'erreur volumétrique sont déterminées analytiquement. Pour certaines de ces composantes, le bruit affectant les mesures est très nuisible et met en question la précision des résultats trouvés même si des opérations d'estimation (moyenne) ont été employées pour palier à ce problème.

Une autre technique de vérification rapide des MOCN [15] a été présentée. Elle consiste à utiliser un artefact non étalonné qui est placé et fixé dans le volume de fonctionnement de la machine qui vient d'être étalonnée. Les coordonnées de certains points de la surface de l'artefact sont déterminées en utilisant un palpeur installé sur le porte outil de la machine et enregistrées dans le contrôleur de la machine. Cette étape constitue une base de référence. Ultérieurement, et à chaque fois qu'il y a besoin d'étalonner la machine, il suffit de placer le même artefact utilisé précédemment au même endroit et de mesurer par palpation les coordonnées des mêmes points de références sélectionnées lors de l'étape de base. Si une différence est constatée par rapports aux coordonnées de base alors une compensation numérique est appliquée automatiquement par le contrôleur de la machine. Cette technique permet un étalonnage rapide mais limité vue que la procédure est effectuée sur un volume restreint du domaine de fonctionnement de la machine. En effet, une vérification qui se limite à ces quelques points sélectionnés d'un certain volume de fonctionnement n'est pas toujours représentative de la totalité du domaine de fonctionnement.

D'un autre côté, B. Bringmann et W. Knapp ont présenté une méthode pour l'étalonnage d'une MOCN 5 axes par "chase the ball" basée sur un modèle [16]. Elle repose sur le concept "chase the ball" figurant dans la norme ASME [17]. Selon cette méthode, un système présenté précédemment dans [18] et constitué de quatre palpeurs placés sur la table de la machine est utilisé pour prendre des mesures sur une sphère en céramique fixée sur le porte outil. Plusieurs mesures sont prises après un mouvement du porte outil selon les cinq axes simultanément pour atteindre certaines positions cibles spécifiques. Par la suite grâce à une modélisation, exploitant ces mesures prises, il est possible de déduire l'erreur volumétrique avec tous ces composants. Cette méthode minimise le temps d'arrêt de la machine (uniquement deux minutes sont requises pour les mesures)

néanmoins elle est basée sur un modèle dont les paramètres estimés ne sont pas toujours précis. Ce qui met en question sa précision dans certains cas. D'un autre côté, elle repose sur l'utilisation d'un palpeur qui ne permet pas de mesurer dynamiquement (lorsque la machine est en mouvement) donc il est impossible de détecter l'effet des forces dynamiques qui pourraient engendrer des erreurs.

De ce fait, G. H. J. Florussen et H. A. M. Spaan ont élaboré une nouvelle approche visant à palier à ce manque en prenant en considération le comportement dynamique de l'outil. Cette approche est dite R-test dynamique pour les tables rotatives sur les machines-outils 5-axes (Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools) [19]. Conventionnellement, le R-test est réalisé statiquement pour mesurer la position et l'orientation d'un axe de rotation par rapport aux trois axes linéaires [20] en plaçant une boule sur la table et en mesurant par palpation cinq points de sa surface situés à des positions spécifiques (quatre sur l'équateur et un sur le sommet). Dans l'optique de réduire le temps d'étalonnage des MOCN 5-axes et pour tenir compte des effets des forces dynamiques, les deux chercheurs ont trouvé le moyen de réaliser ce R-test en mode dynamique. C'est-à-dire pendant un mouvement programmé de la machine selon l'axe C. Les mesures sont prises en continu pendant 30 secondes à une fréquence de 6.5 kHz. Le temps du test est réduit et la qualité des mesures est meilleure sauf que ça se limite à un seul des axes de la machine et il en reste quatre autres à inspecter.

Une autre approche élaborée est l'étalonnage dynamique des machines-outils CNC (Dynamic calibration of CNC machine tools) [21] qui consiste à prendre des mesures de déplacement en continu à une fréquence entre 10Hz et 5kHz pendant le mouvement à vitesse constante de la machine le long de l'axe de mouvement (sur tout l'intervalle disponible) en utilisant un interféromètre laser. Cette méthode permet de détecter l'erreur de positionnement linéaire, l'erreur de rectitude et l'erreur angulaire. En relevant la position en fonction du temps pendant le mouvement nominal de la machine (à vitesse constante) et par un traitement de données permettant de passer au domaine de la vitesse en fonction du temps, il est possible de détecter les erreurs qui se manifesteraient sous forme de fluctuations et ce en se basant sur le principe qu'une machine parfaite (sans erreurs) aurait une vitesse d'avance parfaitement constante pendant son mouvement nominal. Cette méthode est, certes, utile pour détecter les erreurs existantes avec précision (haute résolution), mais, vue que l'analyse est relative au temps et non pas à la position, il est compliqué de pouvoir situer ces erreurs sur l'axe de mouvement avec précision.

Un étalonnage amélioré d'un axe linéaire d'une machine-outil via la capture de données de mouvement en continue [22] a été établi par J. E. Miller et al. Ils ont pensé à réduire le temps pris pour des mesures statiques et améliorer la qualité de ces mesures en mesurant en continue le déplacement selon un axe linéaire de la machine en utilisant un interféromètre. Or ce signal donnant le déplacement en fonction du temps inclue les erreurs mais ne permet pas de les distinguer donc pour ce faire J. E. Miller et al. ont alors identifié la section du mouvement nominal de la machine où sa vitesse est constante puis ils ont déduit la valeur de cette vitesse par la méthode des moindres carrés pour passer par la suite au domaine de la position. Ceci permet d'aboutir à certaines des composantes de l'erreur volumétrique de la machine rapidement et à haute résolution mais cela requiert un test statique qui permettrait de mieux référencer le signal de l'erreur en fonction de la position et de reconstruire l'information qui a été perdue par la méthode des moindres carrés. Ceci montre une dépendance aux mesures statiques éprouvantes, longues et coûteuses et met en question la précision des erreurs évaluées.

Un étalonnage des axes linéaires et rotatifs des machines-outils et des CMM en utilisant un interféromètre de poursuite pendant le mouvement [23] est capable de suivre le retroréflexeur monté à l'outil. Il a été développé par E. B. Hughes et al. dans [24]. Ce dispositif a le même principe de fonctionnement que tout autre interféromètre conventionnel. Il mesure la distance le séparant du retroréflexeur fixé au niveau de l'outil mais sa spécificité réside dans sa capacité à suivre le retroréflexeur. Par conséquent, il permet de mesurer des distances même à la suite d'un mouvement selon plusieurs axes linéaires et de rotation. Ce dispositif est à lui seul capable de mesurer toutes les composantes de l'erreur volumétrique d'une machine-outil 5-axes, contrairement aux instruments de mesures conventionnels. Ceci a été prouvé par cette technique qui consiste à placer l'interféromètre à quatre positions spécifiques différentes et pour chaque position le retroréflexeur est déplacé à plusieurs positions et pour chacune une mesure est prise. Cette configuration permet de déduire toutes les composantes de l'erreur volumétrique de la machine à partir des mesures de déplacement. H. Schwenke et al. ne se sont pas arrêtés là. Ils sont allés plus loin avec cette méthode. Ils ont conçu et mis en place une solution pour réaliser ces prises de mesure en dynamique ce qui a le mérite d'accélérer le processus et d'améliorer la qualité des mesures (résolution supérieure). Cette solution consiste à acquérir le signal du système de mesure de déplacement des cinq axes de la machine (5 signaux : un pour chaque axe) et celui de

l'interféromètre traceur simultanément lors du mouvement de la machine. Les erreurs sont détectées en comparant le signal de l'interféromètre à ceux du système de mesure. Malgré, le défi important en termes de synchronisation des signaux et les incertitudes qui en découlent rencontrés ici, cette technique a permis de franchir un grand pas dans le domaine de la métrologie des machines-outils surtout qu'elle permet de réduire considérablement le temps d'arrêt des machines pour la prise des mesures et elle améliore la qualité et la précision de détection en augmentant la résolution de mesures. Sans oublier le fait qu'elle tient compte de l'effet des forces dynamiques puisqu'elle s'applique lors du mouvement ce qui est représentatif du fonctionnement normal de la machine.

Notre objectif est de concevoir et de mettre en place un système similaire mais basé sur les instruments de mesures conventionnels disponibles dans toute industrie et dans tout laboratoire travaillant avec les MOCN. En effet, nous cherchons à implémenter une solution permettant de dynamiser les opérations de mesurage réalisées dans le cadre de l'étalonnage des MOCN. Ceci permettrait de réduire considérablement le temps requis pour la prise des mesures et par conséquent le temps d'arrêt des machines qui implique des coûts élevés aux industriels. Des mesures en dynamiques seraient de meilleure qualité grâce à la résolution élevée et auraient des résultats plus représentatifs vu qu'elles sont effectuées lors du fonctionnement normal de la machine (pendant le mouvement) ce qui permet de prendre en considération les effets des forces dynamiques habituellement négligées lors des mesurages quasi-statiques.

CHAPITRE 3 ARCHITECTURE

L'objectif est de concevoir et mettre en place un système permettant de réaliser l'acquisition de la position de l'outil vue par l'encodeur de la machine (et transmise au contrôleur) et l'acquisition de la position réelle de l'outil simultanément et en temps réel en vue de les comparer ultérieurement pour étalonner et diagnostiquer la machine en analysant les données obtenues. Ces acquisitions sont réalisées de façon dynamique et c'est là que réside le défi le plus exigeant à relever, la difficulté et l'originalité du travail. En effet des acquisitions similaires en statique seraient beaucoup plus simples à mettre en place. Il suffirait de placer l'outil à une certaine position et de prendre la mesure de la position réelle de cet outil. En revanche, ce qui est contraignant pour les acquisitions en dynamique est la synchronisation entre les deux mesures prises. C'est-à-dire que, en vue de pouvoir comparer les deux mesures et effectuer l'analyse des résultats convenablement, il est primordial que les deux mesures soient effectuées exactement au même instant. En effet, les deux mesures sont prises lors du mouvement de l'outil donc nous devons nous assurer que la position à l'encodeur acquise à l'instant t correspond exactement à la position réelle acquise à ce même instant t . Tout retard ou décalage dans la prise de données rendrait le reste du travail impossible. Ainsi la synchronisation est primordiale. Par conséquent, nous consacrons une importante partie du travail pour l'atteindre et s'en assurer.

Nous commençons par la conception du système d'acquisition nécessaire à la prise des mesures. Un système d'acquisition de données sert à effectuer la mesure d'un phénomène physique (exemple : température, débit, force, vitesse ...) par le biais d'un ordinateur. Un tel système est réputé pour être économique, flexible et, surtout, puissant grâce à la productivité élevée, à l'affichage plaisant, au traitement puissant et à la connectivité facile assurés par l'ordinateur. [25] En général, un système dédié à l'acquisition de données, est constitué des éléments suivants :

Un capteur : qui permet de prendre la mesure d'une grandeur physique (le déplacement dans notre cas) puis de générer un signal électrique analogique ou numérique qui lui est proportionnel [26].

Un matériel d'acquisition : qui est utilisé pour l'acquisition des mesures. C'est-à-dire qu'il permet de transmettre les signaux des capteurs à l'ordinateur pour qu'il puisse les exploiter car ce dernier ne peut pas recevoir ce genre de signaux directement. Le matériel d'acquisition peut, dans certains cas, inclure un conditionneur de signaux et un convertisseur analogique numérique. Il est relié à

l'ordinateur par un bus (via un emplacement ou un port de connexion ou même sans fil) qui assure la communication entre les deux. Divers exemples de bus existent tels que PCI, PCI express, PXI, PXI express, USB, Ethernet, WIFI... [25].

Une interface de conditionnement : Elle est indispensable dans le cas où le conditionnement n'est pas assuré par le matériel d'acquisition surtout si le signal du capteur n'est pas toléré par les entrées disponibles sur le matériel d'acquisition. Cette interface permet d'adapter ce signal aux exigences imposées par la gamme d'entrées du matériel d'acquisition. Elle peut comporter un filtrage, une isolation, une amplification et/ou une atténuation.

Un ordinateur : qui sert à commander le module d'acquisition, à visualiser les mesures prises, les stocker et les exploiter. La Figure 3.1 illustre un système d'acquisition de données dans le cas général [27].

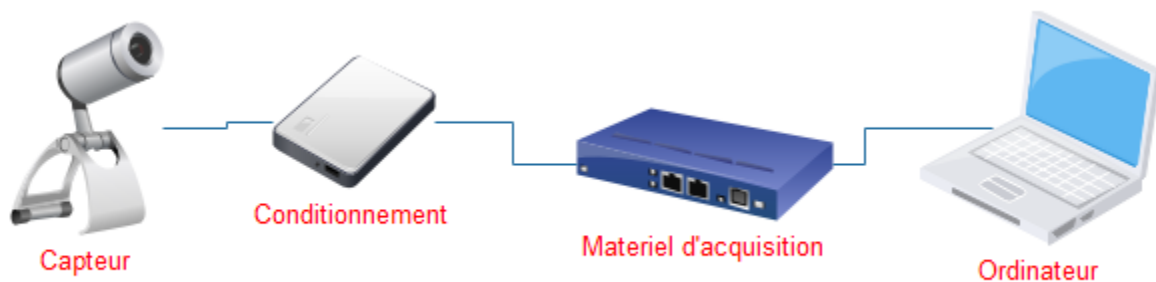


Figure 3.1 : Système d'acquisition de données dans le cas général

Notre dispositif ne déroge pas à la règle. Il comporte tous les éléments cités précédemment sauf que dans notre cas nous envisageons de réaliser l'acquisition de deux mesures différentes (position de l'outil à l'encodeur et position réelle de l'outil) de façon synchronisée. Donc ce que nous cherchons à mettre en place sont deux systèmes d'acquisition distincts (un pour chacune des deux mesures).

Ces deux systèmes doivent être liés pour assurer la synchronisation. Ainsi, Nous avons deux possibilités :

* utiliser deux matériels d'acquisition différents (un pour chaque mesure) et les connecter au même ordinateur qui sera responsable de la synchronisation.

* utiliser un seul matériel d'acquisition pour les deux mesures et sur lequel seront connectés les deux capteurs.

Nous optons pour la deuxième solution parce que c'est celle qui confère la meilleure synchronisation. En effet, il est plus simple de synchroniser deux mesures sur un même matériel d'acquisition que deux mesures en provenance de deux matériels différents.

Ainsi, pour récapituler, et comme le montre la Figure 3.2, notre système d'acquisition comporte, bien évidemment, deux capteurs distincts : le premier pour mesurer la position de l'outil vue par la machine (encodeur de la machine) et le deuxième pour la position réelle de l'outil. Ces deux capteurs seront connectés sur un même matériel d'acquisition en passant par deux interfaces de conditionnement distinctes (une pour chaque capteur). Le matériel d'acquisition est relié à un ordinateur via un bus de communication.

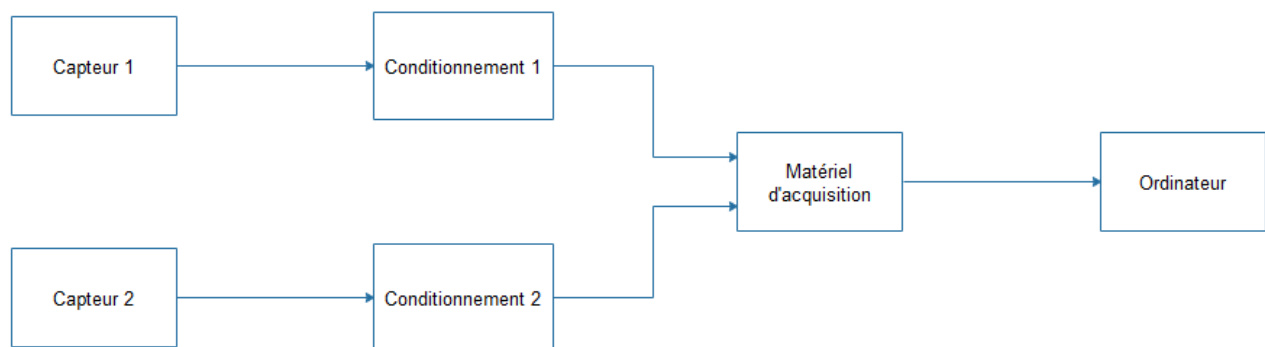


Figure 3.2 : L'architecture de notre système d'acquisition

CHAPITRE 4 CHOIX DES INSTRUMENTS

Une fois l'architecture du système bien définie, nous nous intéressons au choix des éléments adéquats pour notre application. En effet ce choix est crucial pour l'aboutissement de notre projet. Durant cette partie nous nous proposons de concevoir une instrumentation apte à remplir les tâches requises tout en veillant à minimiser le coût de la solution proposée surtout en évitant les dépenses inutiles. Ainsi, il est primordial de faire le point sur ce dont nous disposons au Laboratoire LRFV et qui serait utile dans le cadre de notre application surtout que notre laboratoire est très bien équipé en termes d'instruments divers et variés dans le domaine de la métrologie des MOCN. Nous nous proposons, donc, d'effectuer une étude du matériel disponible dans le laboratoire LRFV. Ceci nous permet de prendre conscience de ce qui pourrait bien nous servir dans la perspective d'atteinte des objectifs aux moindres coûts en évitant les achats inutiles. En revanche, cela restreint notre marge de manœuvre et limite nos choix puisque ce matériel représente une contrainte importante que nous nous imposons et qui doit être considérée le long du travail.

4.1 La Machine-Outil à Commande numérique (MOCN)

La machine ciblée est une MOCN KX8 Five de la marque française Huron. C'est une machine-outil 5 axes : trois axes de translation (X, Y et Z) et deux axes de rotation (A et C). L'architecture de cette machine est illustrée par la Figure 4.1.

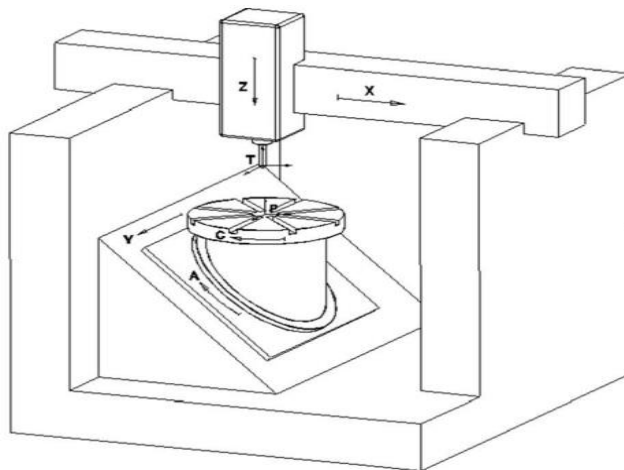


Figure 4.1 : Architecture de la MOCN Huron KX8 Five [28]

Comme le montre la Figure 4.1, le mouvement de translation selon les axes X et Z sont assurés par la branche côté broche alors que la table de la machine, la branche pièce, effectue le reste des mouvements : la translation en Y et la rotation en A et C.

Nous cherchons à déterminer l'erreur de positionnement de l'outil sur l'axe Y ce qui revient à comparer la position à l'encodeur de la machine à la position réelle de l'outil en mouvement. Ainsi, nous nous intéressons à la position de l'outil selon l'axe Y uniquement.

La course maximale que notre MOCN peut effectuer selon l'axe Y est de 700 mm avec une vitesse maximale pouvant atteindre les 40 m/min. Néanmoins durant un usinage, la machine ne peut pas atteindre une telle vitesse par risques de briser l'outil. La vitesse maximale est de 10 m/min et peut être atteinte seulement lors de l'usinage de certains matériaux réputés souples tels que l'aluminium.

4.2 Encodeur Machine et Interfaces Électroniques IBV

Comme toute autre MOCN, notre machine dispose, pour chaque axe, d'un encodeur qui mesure en tout temps la position de l'outil (ou de la table). Cette mesure est par la suite transmise au contrôleur de la machine à des fins d'asservissement et de contrôle.

Le contrôleur, permet de commander les mouvements de l'outil et/ou de la table selon les cinq axes de mouvement en vue de réaliser la trajectoire voulue par le programmeur pour aboutir à une pièce usinée à partir du brut [29].

L'encodeur qui nous intéresse est celui qui mesure la position selon l'axe Y. Dans notre cas, cet encodeur est le "CVP" de la marque Fagor. Il délivre à la sortie deux signaux sinusoïdaux A et B déphasés de 90° d'amplitude $1\text{ V} +20\%$, -40% crête à crête centrés à $2.5\text{V} \pm 0.5\text{V}$. Chaque période de ces signaux correspond à $20\text{ }\mu\text{m}$.

Les interfaces électroniques IBV sont des dispositifs permettant de convertir les signaux de sortie sinusoïdaux A et B des encodeurs des MOCN en signaux carrés. Ces dispositifs du modèle IBV6172 du constructeur allemand Heidenhain sont des boîtiers qui ont été installés sur la machine dont nous disposons. Ils sont illustrés dans la Figure 4.2.



Figure 4.2 : Interface électronique IBV vue de l'extérieur

Ils ont une seule entrée X1 pour les deux signaux sinusoïdaux A et B et deux sorties : la première X3 sert à dupliquer les signaux de l'entrée pour qu'ils soient transmis au contrôleur de la machine, alors que la deuxième X2 délivre deux signaux carrés avec une interpolation de fréquence des signaux d'entrée. Ceci est illustré par la Figure 4.3.

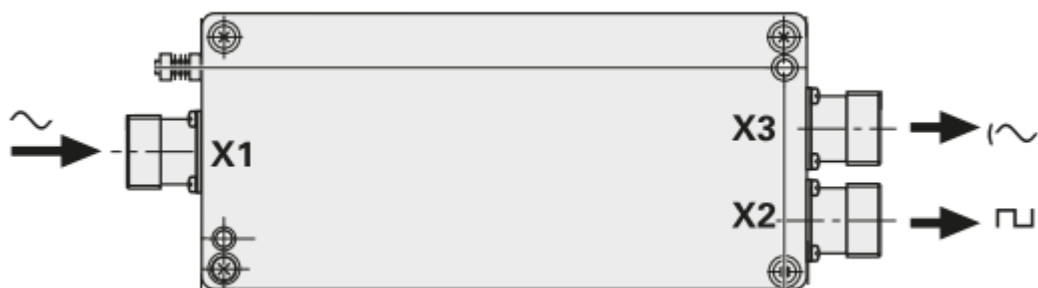


Figure 4.3 : entrées/sorties des IBV

Les mesures de position prises par l'encodeur de la machine et transmises au contrôleur sont nécessaires pour la bonne opération de la machine. Ces mesures assurent un retour d'information au contrôleur lui permettant de commander le mouvement de la broche en respectant la trajectoire souhaitée et d'arrêter à l'atteinte de la position voulue. En d'autres termes l'encodeur de la machine constitue un élément essentiel de la boucle d'asservissement de position et l'information qu'il

transmet est essentielle pour l'aboutissement de la tâche exécutée. Ceci est illustré par la Figure 4.4.

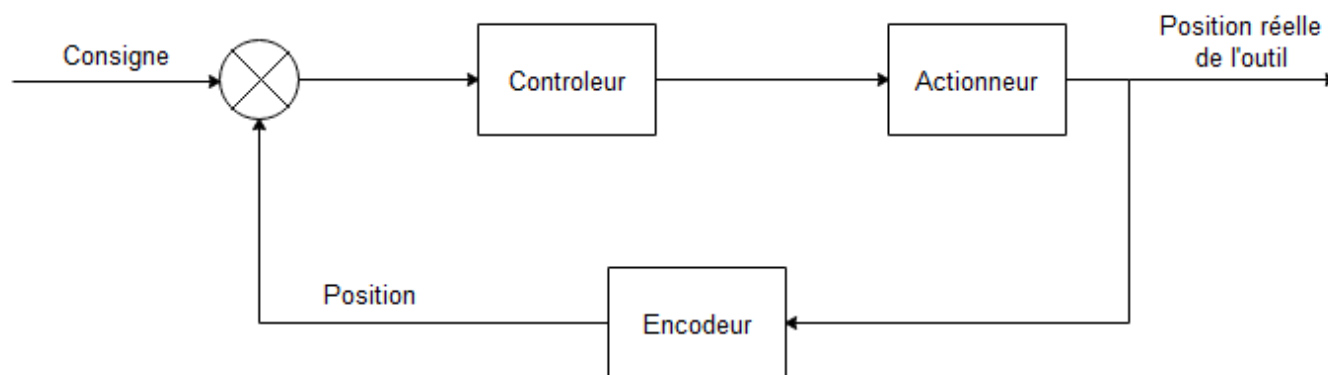


Figure 4.4 : boucle d'asservissement de position de la MOCN

Ainsi, ce signal en provenance de l'encodeur doit être transmis en tout temps au contrôleur de la machine. Pour cela, les concepteurs des interfaces électroniques IBV ont prévu une sortie X3 permettant de dupliquer ce signal pour ne pas altérer le fonctionnement habituel de la machine.

En ce qui concerne la deuxième sortie X2 de ces interfaces, le signal qui en émane est un signal carré de 1 V d'amplitude qui résulte d'une conversion analogique numérique et d'une interpolation de fréquence $\times 10$ du signal d'entrée X1. Cette interpolation fait que la fréquence du signal de sortie soit 10 fois plus élevée que celle du signal d'entrée. Concrètement, l'IBV divise chaque période du signal d'entrée en dix divisions et assigne une période du signal de sortie à chaque division. Ainsi, il en résulte pour chaque période du signal X1 dix périodes du signal X2. C'est le principe de l'interpolation [30].

La fiche technique des interfaces électroniques IBV6172 est présentée dans l'annexe A.

4.3 Le choix du capteur : L'interféromètre [31]

Dans la littérature, plusieurs techniques ont été développées pour l'étalonnage des MOCN. Elles reposent sur différents types de mesures effectuées en utilisant divers instruments.

Le choix des instruments de mesure à utiliser est primordial pour le bon aboutissement de l'opération d'étalonnage. Ceux qui sont les plus utilisés dans la littérature sont : la barre à bille [32], l'interféromètre laser, les capteurs capacitifs et les capteurs optiques [33]. Pour notre travail, nous avons opté pour l'interféromètre laser. Ce choix est fait en procédant par élimination. En effet, la barre à bille est destinée pour des tests rotatifs et elle n'est pas adaptée à la détermination de l'erreur de positionnement sur un axe linéaire. D'un autre côté, le capteur capacitif a une étendue de mesure très restreinte qui se limite à un intervalle entre 20 μm et 1 mm ce qui est insuffisant car la course selon l'axe Y de la machine que nous cherchons à inspecter est de 700 mm. Finalement, nous avons préféré l'interféromètre laser pour sa résolution de mesure pouvant atteindre les quelques nanomètres et nettement meilleure que celle des capteurs optiques. L'interféromètre laser est l'instrument de mesure le plus utilisé pour l'étalonnage des MOCN [14]. En effet, il est très adapté pour les mesures des distances sur des axes longs [7]. Il se distingue par sa haute précision (résolution élevée), une large étendue de mesure et un temps de vérification réduit [34]. Il est considéré comme étant le plus fiable et le plus précis [8] et permet, non seulement de prendre les mesures à haute densité mais aussi de mesurer en dynamique [21]. Ce qui fait de lui l'instrument le plus adapté pour notre application.

L'interférométrie est une technique très répandue pour mesurer les distances avec une précision pouvant aller jusqu'au nm près. Elle est utilisée surtout pour l'étalonnage des instruments de mesure et dans le domaine de l'usinage de précision de par son aspect stable et précis. Son principe repose sur l'aspect ondulatoire de la lumière. En effet, en présence de deux faisceaux lumineux qui suivent le même chemin, une interférence se crée entre les deux. Cette interférence varie selon la différence entre les distances parcourues par les deux faisceaux. Par conséquent, la fixation de l'un des chemins parcourus par la lumière qui serait considérée comme une référence et le déplacement du deuxième permettrait de déduire avec exactitude la quantité de déplacement effectuée en inspectant l'interférence produite par cette différence entre les deux chemins.

Plus concrètement, la différence de distance qui existe entre les deux chemins parcourus par la lumière crée des franges d'interférence entre les ondes des deux signaux. Cette interférence résulte de la différence de phase des ondes qui varie avec la distance.

Le détecteur analyse le signal reçu pour en déduire le déplacement. Or, puisque les deux ondes qui s'interfèrent sont, à la base, issues du même signal lumineux donc ils ont la même longueur d'onde λ . Une période de déplacement (communément appelée "cycle") correspond à la moitié de cette longueur d'onde. Ainsi, la longueur d'onde est primordiale pour la mesure du déplacement avec exactitude. Sa valeur doit être connue avec précision. Pour cette raison la source laser (hélium néon) est la source de lumière la plus utilisée pour ce genre de dispositifs reposant sur cette technique de mesure, parce que le laser est réputé pour être stable et sa longueur d'onde est connue ($\lambda=633$ nm). Néanmoins cette dernière dépend de plusieurs facteurs tels que le milieu de propagation de l'onde et les conditions environnementales (température, humidité, pression ...) ce qui signifie qu'elle doit être calculée à chaque utilisation pour assurer une mesure précise du déplacement. Le détecteur repose sur une formule simple pour déduire le déplacement :

$$d = \frac{\lambda N}{2}$$

avec :

d : le déplacement recherché

N : le nombre de franges détectées

λ : la longueur d'onde du signal lumineux.

L'interféromètre dont nous disposons est le ML10Q de la marque Renishaw qui est l'un des leaders mondiaux dans la création de dispositifs de mesures destinés à inspecter les MOCN et les CMM. Le ML10Q est un dispositif de mesure basé sur l'interférométrie laser. Il est très utilisé pour l'étalonnage des MOCN et des CMM.

Il permet de prendre diverses mesures tels que : les mesures de positionnement linéaires (sur l'un des axes linéaires X, Y ou Z), les mesures angulaires (tangage, lacet), la rectitude d'un axe, la perpendicularité entre deux axes, la planéité ou la mesure de position en rotation (sur l'un des axes de rotation A, B ou C). Chaque type de mesure nécessite une installation particulière sur la machine de certains composants (fournis avec le dispositif) qui diffèrent d'un type de mesure à l'autre.

Toutes ces options de mesure peuvent être effectuées en dynamique c'est-à-dire lors du fonctionnement de la machine et lorsqu'il y a mouvement sur les axes inspectés. Dans notre cas, nous cherchons à acquérir la position linéaire (sur l'axe Y de notre machine Huron KX8 Five) en dynamique donc le ML10Q de Renishaw constitue un choix adéquat pour remplir cette tâche. Il suffit d'installer le dispositif de la façon adéquate permettant de mesurer la position sur l'un des axes linéaires de la machine. Cette installation est décrite par la Figure 4.5.

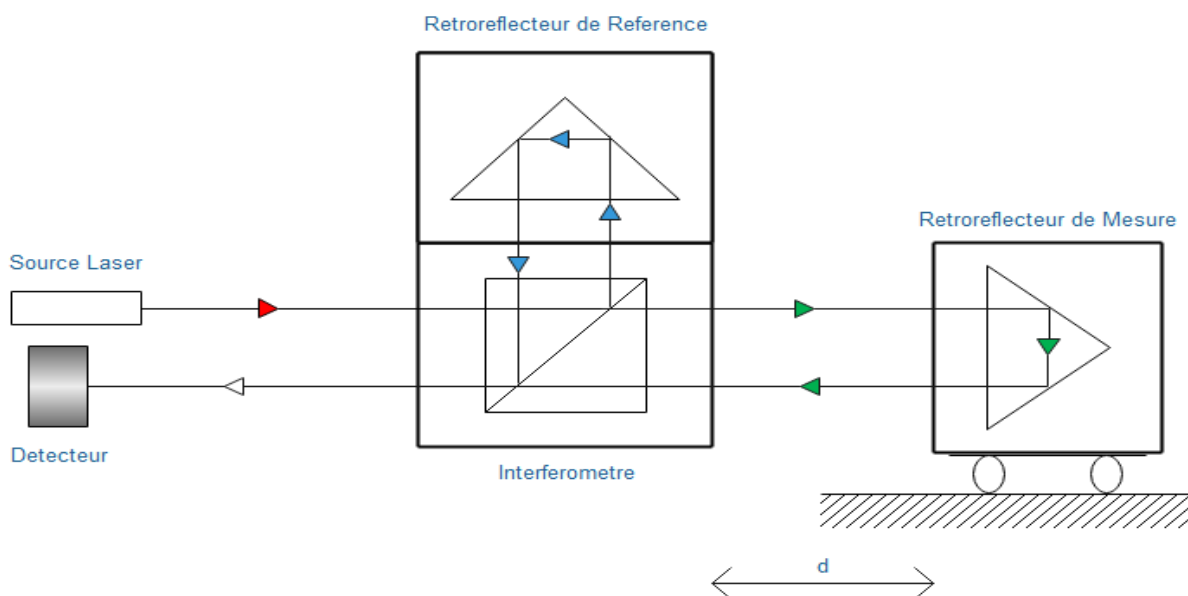


Figure 4.5 : Représentation simplifiée de l'installation de l'interféromètre pour la mesure de la position sur un axe linéaire

Le ML10Q est composé d'une source laser hélium-néon, des composants optiques à installer convenablement selon le type de mesure à effectuer, une unité de compensation environnementale EC10 et une interface DX10 (USB) pour relier le dispositif à un ordinateur où est installé le logiciel d'acquisition de données de Renishaw.

La source laser dont nous disposons est réputée pour être très stable (longueur d'onde du signal constante et connue) et c'est ce qui fait que la mesure de ce dispositif soit aussi précise. Malgré cela, la longueur d'onde du signal laser demeure sujette à des variations causées par la nature du milieu de propagation et les conditions environnementales. Pour cela, Renishaw a prévu une unité

de compensation environnementale EC10 qui sert à compenser l'effet de la température, de l'humidité et de la pression en prenant en compte la nature du milieu afin de déterminer avec précision la longueur d'onde du laser en tout temps. Sa valeur est affichée par l'interface du laser lors de l'utilisation.

Contrairement au signal de l'encodeur de la machine qui n'est pas accessible parce qu'il est destiné uniquement au contrôleur (ce qui nous a contraint à installer les interfaces électroniques IBV 6172 pour l'acquérir), dans le cas de l'interféromètre le problème ne se pose pas.

En effet, le modèle ML10Q, dont nous disposons, est une variante de la version standard ML10 et elle se caractérise par une sortie supplémentaire délivrant deux signaux carrés, d'amplitude variant de 0 V à 5 V, déphasés de 90° similaires aux signaux A et B d'un encodeur et donc compatible avec l'utilisation de compteurs électroniques.

4.4 Le Matériel d'acquisition

Le choix de cet élément dépend de l'architecture complète du système et du choix des autres composants. En effet pour effectuer correctement le choix de ce matériel nous devons définir nos besoins en nous reposons sur divers critères tels que le nombre d'entrées/sorties, la fréquence d'échantillonnage, la résolution, le type de communication avec l'ordinateur... [35] Cette étude est présentée en détail dans l'annexe B. Ainsi en se basant sur ces quatre critères de choix du matériel d'acquisition, nos besoins sont récapitulés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Besoins pour un matériel d'acquisition adéquat

Critères	Entrées/sorties	Fréquence d'échantillonnage	Résolution verticale	Type de communication
Besoins	2 entrées compteurs d'encodeurs 0 sorties	1.05 MHz	Peu importe	PCI, PCI Express, PXI, PXI Express ou USB

Pour le choix de notre matériel d'acquisition nous nous focalisons sur les produits du constructeur américain National Instrument qui est le leader mondial dans le domaine de solutions de test, de mesure et de contrôle. Il offre une large gamme de produits. Une étude comparative des diverses catégories existantes est présentée dans l'annexe C.

Malgré les différences existantes entre les trois catégories (PCI, CompactDAQ USB et PXI), elles demeurent toutes valables et assez performantes pour pouvoir répondre à nos besoins. Elles sont toutes aptes à remplir les tâches escomptées. Il suffit d'en choisir la plus avantageuse dans notre cas et de bien le dimensionner. En effet, en fixant le choix de la catégorie de matériel, le travail est loin d'être terminé puisqu'il reste à choisir parmi la large gamme de cette catégorie proposée par NI les composants du système d'acquisition permettant de répondre à nos besoins répertoriés dans le Tableau 4.1 : Besoins pour un matériel d'acquisition adéquat.

En se basant sur l'étude de l'annexe C, le PXI est le meilleur choix pour notre application, malgré son coût élevé, parce qu'il est doté de la meilleure technologie de bus surtout que ce critère est primordial pour assurer la meilleure synchronisation. En revanche, il s'avère que le laboratoire LRFV possède un matériel CompactDAQ de NI qui couvre bien nos besoins. Donc nous décidons de nous contenter de ce matériel disponible pour des raisons économiques sachant que la catégorie CompactDAQ est aussi un choix judicieux de par sa portabilité, son coût modéré et son aspect modulaire.

Il s'agit d'un châssis NI9174 et de deux modules d'entrées/sorties numériques NI9401. Ce matériel montré dans la Figure 4.6, dispose de quatre compteurs encodeurs et est capable d'atteindre une fréquence d'échantillonnage de 20 MHz avec une résolution de 32 bits. Ils permettent le comptage des fronts, des impulsions des périodes et demi-périodes et même des largeurs d'impulsions.

En ce qui concerne la mesure de position par ces compteurs, il est possible d'effectuer un codage en quadrature X1, X2 ou même X4. Ces codages sont mieux décrits par la Figure 4.7.

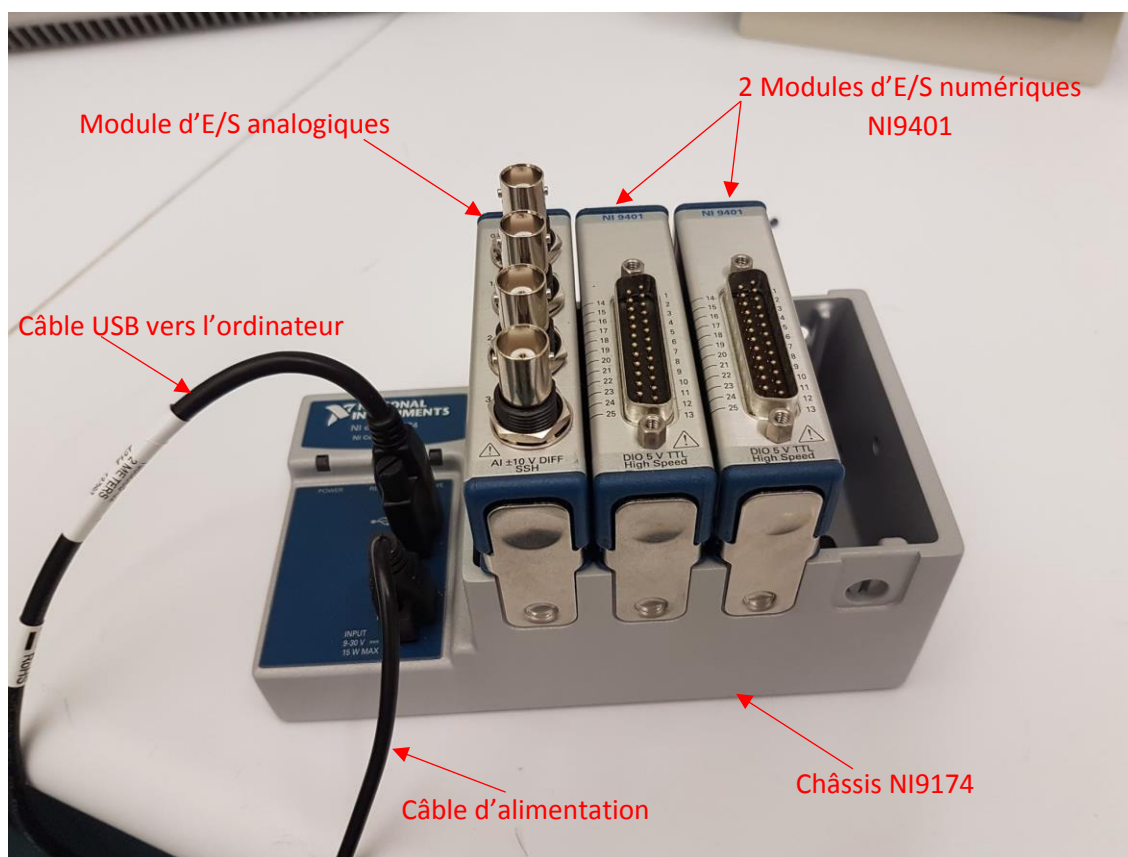


Figure 4.6 : Matériel d'acquisition utilisé

Remarque : Le module d'E/S analogique présent dans la Figure 4.6 n'est pas utilisé pour notre application.

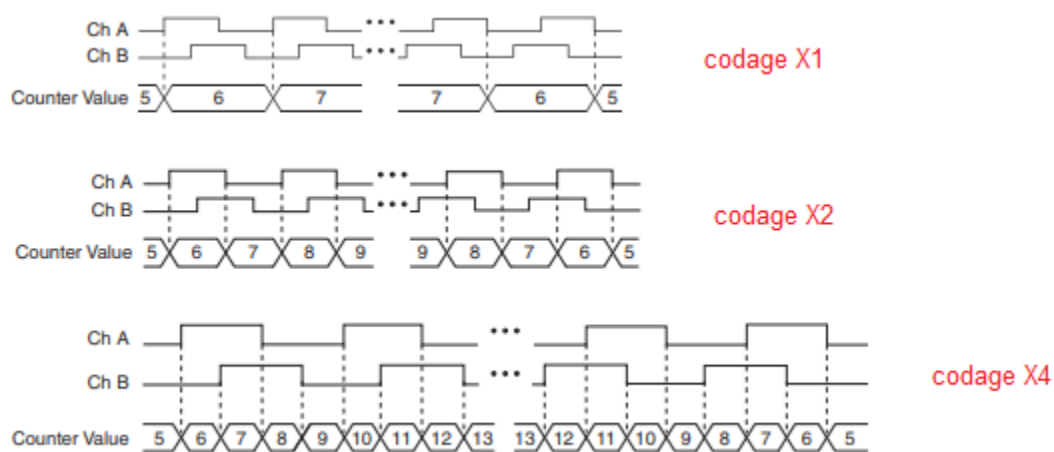


Figure 4.7 : codage X1, X2 et X4 des compteurs encodeurs du châssis NI9174 [36]

CHAPITRE 5 LA SYNCHRONISATION

Ce chapitre porte sur la synchronisation entre les deux compteurs encodeurs du matériel d'acquisition NI.

5.1 Architecture

La synchronisation est évaluée en entrant le même signal aux deux compteurs puis en comparant les mesures prises par ces deux compteurs.

En effet, si les mesures prises par les deux compteurs sont exactement les mêmes et aucune différence entre les deux n'est constatée alors nous pouvons confirmer la synchronisation et passer aux tests sur la machine qui nous intéressent. Ainsi, pour ce faire, nous mettons en place un dispositif d'essai qui permet de simuler le fonctionnement de notre système. Ceci est illustré par la Figure 5.1.

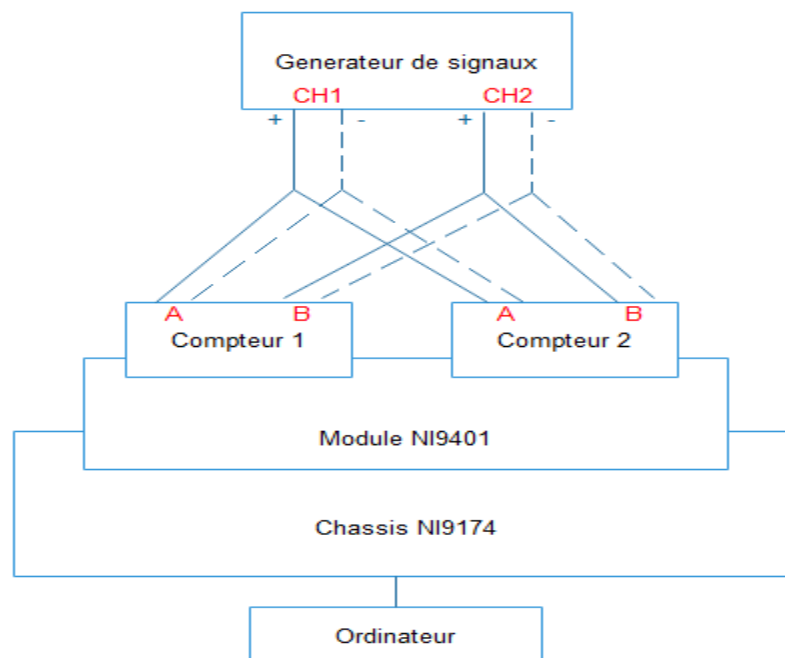


Figure 5.1: Schéma du banc d'essai conçu pour la synchronisation

5.2 Choix des instruments

Ce banc d'essai comporte le même matériel d'acquisition et le même ordinateur que nous avons choisi d'utiliser pour notre application. En revanche, en ce qui concerne l'interféromètre et l'encodeur de la machine, nous ne pouvons pas les utiliser vu qu'ils sont reliés à la machine et que leur fonctionnement en dépend. D'où l'utilité de ce banc d'essai qui est présenté par la Figure 5.1. Donc la solution est d'utiliser un dispositif permettant de générer les mêmes signaux issus des deux capteurs. Vu que chaque sortie de ces capteurs renvoie deux signaux carrés (A et B) déphasés de 90° donc nous avons besoin d'un générateur capable de générer deux signaux similaires (carrés déphasés de 90°) avec une fréquence pouvant atteindre les 530kHz (fréquence maximale des deux capteurs déterminée à l'annexe B).

Durant cette étape nous cherchons à atteindre la synchronisation des acquisitions des deux compteurs encodeurs du matériel d'acquisition. Ce qui signifie que nous cherchons à ce que la mesure lue et prise par le premier compteur corresponde exactement à celle lue et prise par le deuxième à ce même instant précis.

Ce dont nous avons besoin est un générateur de fonctions capable, via deux chaînes indépendantes, de générer simultanément deux signaux carrés déphasés de 90° d'amplitude 5V et de fréquence pouvant atteindre les 530kHz.

Une étude comparative basée sur les critères importants à considérer pour le choix de ce genre de dispositif tels que la fréquence du signal, l'amplitude du signal, la fréquence d'échantillonnage et la résolution est présentée à l'annexe D et a permis de choisir le modèle AFG1022 de Tektronix.

5.3 Mode opératoire

Cette acquisition est commandée et supervisée via un logiciel que nous concevons et réalisons une fois que la partie matérielle est bien conçue et mise en place. Cette étape de développement logiciel est effectuée par itération surtout que la synchronisation n'est pas aisée à atteindre et qu'elle représente même l'un des défis les plus difficiles et les plus importants du projet. En effet, le travail consiste à mettre en place le programme, réaliser les tests de vérification, analyser les résultats de ces tests et finalement valider le programme si la synchronisation est confirmée ou apporter des améliorations à ce programme et développer une nouvelle version si la synchronisation n'est pas

encore atteinte et reprendre le même processus. Ce processus est illustré par le diagramme de la Figure 5.2.

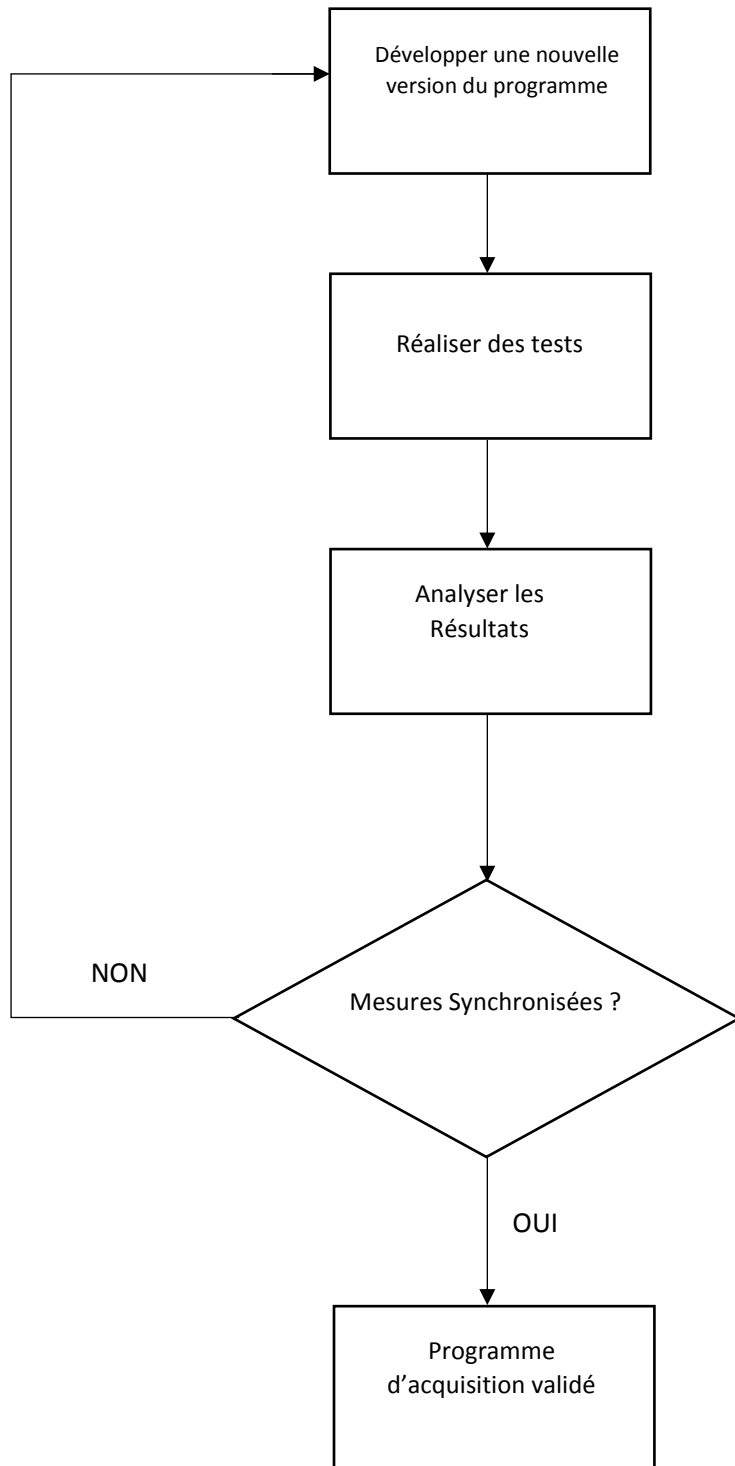


Figure 5.2 : Processus appliqué pour atteindre la synchronisation

5.4 Mise en place

Une fois que le dispositif d'essai est bien conçu et le processus pour l'atteinte de la synchronisation et pour l'élaboration d'un programme d'acquisition adéquat est bien fixé, il ne reste plus qu'à mettre en place le système et à appliquer ce processus.

Un aspect important à considérer lors de la conception de ce genre de systèmes, mettant en jeu plusieurs dispositifs, est la façon de les connecter entre eux. En effet, ces dispositifs ne sont pas toujours compatibles et ils requièrent souvent une adaptation de câbles pour pouvoir les mettre en liaison ainsi qu'un conditionnement de signaux.

D'après la Figure 5.1 montrant le système, nous constatons l'existence de deux connexions à considérer :

La première connexion : est entre le châssis NI9174 du matériel d'acquisition et l'ordinateur. Dans ce cas, nous n'avons besoin d'aucune adaptation puisque cette connexion est prévue par le concepteur du châssis et est assurée par un câble USB.

La deuxième connexion : entre le générateur de signaux et le module d'entrées/sorties numériques NI9401 est un peu plus compliquée et nécessite une adaptation des câbles. Nous utilisons un connecteur BNC en T pour dupliquer chacun des deux signaux de sortie (CH1 et CH2) du générateur. Ce qui nous permet d'avoir quatre signaux de sortie véhiculés par des câbles BNC comme le montre la Figure 5.3.

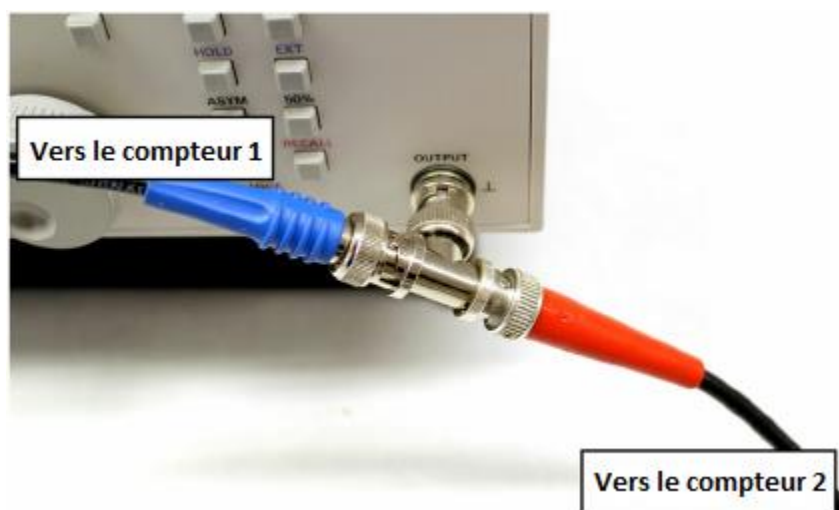


Figure 5.3 : Duplication des signaux de l'une des chaînes du générateur de tension

D'un autre côté, le module NI9401 est équipé d'un port DSUB25 male avec 25 pins numérotés de 1 à 25. Le rôle de chaque pin diffère d'une application à une autre. Il dépend de la fonction souhaitée. Dans notre cas nous cherchons à utiliser deux des quatre compteurs disponibles dans notre matériel d'acquisition. Le brochage de ces compteurs est présenté à l'annexe E. Pour l'adaptation entre les câbles BNC et le port DSUB25, nous utilisons un adaptateur permettant de convertir une prise DSUB25 en un bornier à vis. Ceci est illustré par la Figure 5.4.



Figure 5.4 : Adaptateur DSUB25 Bornier a vis

Cet adaptateur nous permet, non seulement de brancher les câbles BNC sur les broches voulues mais aussi de modifier aisément ce branchement en cas de besoin et peut très bien servir pour d'autres applications futures.

Nous dénudons l'une des extrémités des câbles BNC pour pouvoir les brancher sur le bornier à vis de l'adaptateur que nous connectons au module NI9401 via un câble DSUB25 male/femelle. Le dispositif d'essai mis en place est illustré par la Figure 5.5.

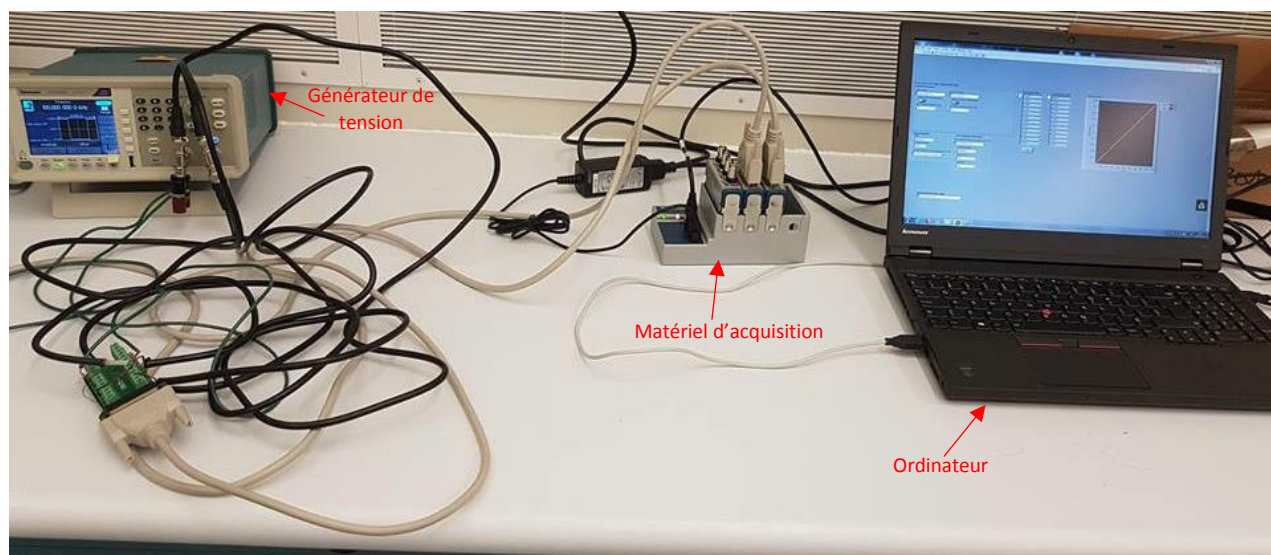


Figure 5.5 : Image réelle du dispositif d'essai mis en place

CHAPITRE 6 CONCEPTION ET RÉALISATION DU PROGRAMME DE PRISE DES MESURES

Après avoir bien conçu et mis en place le banc d'essai, nous sommes en mesure de développer le programme d'acquisition requis pour notre application. Pour ce faire, nous suivons le processus décrit précédemment et illustré par la Figure 5.2 dans le but d'aboutir à un programme logiciel permettant de commander et de superviser le fonctionnement du matériel d'acquisition (en particulier les deux compteurs) tout en assurant la synchronisation voulue.

6.1 Labview

Comme la plupart des dispositifs conçus par National Instruments, le fonctionnement de notre matériel d'acquisition est programmable via le logiciel Labview.

Labview est un logiciel de programmation graphique mettant à la disposition de l'utilisateur une large bibliothèque de blocs de fonctions (qui réalisent toutes sortes de fonctions diverses et variées). L'association de certains de ces blocs d'une certaine manière, permet de commander le fonctionnement du matériel NI selon les préférences de l'utilisateur.

Chaque bloc réalise une fonction particulière et peut être configuré de diverses façons. Néanmoins, un seul bloc est rarement suffisant pour pouvoir commander un matériel. C'est le choix des blocs à utiliser et la façon de les associer ensemble qui détermine les fonctions qui seraient réalisées par le matériel. Ainsi, un programme Labview n'a pas l'apparence ordinaire d'un programme conventionnel avec plusieurs lignes de code mais plutôt l'apparence d'un programme graphique avec plusieurs blocs fonctionnels reliés entre eux et configurés de façon à répondre aux besoins et préférences de l'utilisateur.

Labview permet aussi de mettre en place une interface pour la supervision et la commande du fonctionnement du matériel. Cette interface peut, également, être personnalisée selon les besoins et les préférences de l'utilisateur.[37]

6.2 Programme d'acquisition

6.2.1 Besoins

Nous cherchons à concevoir un programme d'acquisition qui permet de répondre aux besoins suivants :

- **L'acquisition** de toutes les mesures prises et transmises par les deux capteurs avec une fréquence d'échantillonnage ajustable par l'utilisateur. En effet, vu que la fréquence d'échantillonnage dépend de la fréquence maximale des deux signaux des capteurs qui, elle-même, dépend de la vitesse de déplacement de la table de la machine. Donc il vaudrait mieux régler la fréquence d'échantillonnage avant chaque test selon la vitesse maximale de déplacement utilisée pour ce test.
- **L'affichage** des données lors de la prise des mesures sous forme de :
 - Graphe contenant les deux courbes d'évolution des données prises au cours du temps et en temps réel lors des tests.
 - Tableau contenant des données prises au cours du temps et affichées en temps réel.
 Ceci permet de suivre et de superviser la prise des mesures durant chaque test
- **L'enregistrement** des données dans un fichier accessible ultérieurement pour pouvoir les analyser de façon plus détaillée et plus approfondie et, si nécessaire, apporter les traitements requis des données contenues dans le fichier afin de mieux percevoir tout comportement qui pourrait nous intéresser en vue de tirer des conclusions.
- **La synchronisation** lors de l'acquisition des données des deux capteurs. Chaque couple de mesures (une mesure pour chaque capteur) correspond parfaitement aux deux mesures des deux capteurs prises exactement au même instant. En d'autres termes chaque mesure acquise à partir du premier capteur doit être associée à la mesure du deuxième capteur qui lui correspond.

Pour atteindre notre objectif en respectant toutes ces exigences nous procédons comme décrit par le processus illustré dans la Figure 5.2.

6.2.2 Conception et réalisation d'une première version du programme

Ainsi nous commençons par une première version du programme où nous nous focalisons sur la partie concernant l'acquisition, l'affichage et l'enregistrement des données dans un fichier et nous reportons la synchronisation à une version ultérieure vue qu'elle nécessite plusieurs essais pour être maîtrisée. Comme pour tout programme Labview, nous commençons par le choix des blocs fonctionnels nécessaires et adéquats, nous les relient par les liaisons appropriées et nous configurons chacun d'entre eux selon nos besoins et nos préférences. Les deux blocs responsables du début des actions d'acquisition de chaque compteur sont placés dans une même boucle pour assurer leur simultanéité. Cette première version est présentée dans l'annexe F. Ce programme permet, en premier lieu, de choisir le nom et l'emplacement du fichier où seront stockées les données acquises. Une fois ceci fait par l'utilisateur, le programme commence l'acquisition des deux signaux simultanément.

Une interface permet de sélectionner les deux compteurs encodeurs du matériel NI qui s'occupent de cette acquisition et de choisir le type de codage (X1, X2 ou X4) utilisé pour chacun. Cette interface, qui est présentée à l'annexe G, permet aussi de suivre l'évolution du fonctionnement du système grâce à un tableau contenant les mesures prises en nombre de cycles ainsi qu'un graphe présentant les deux courbes illustrant les deux signaux acquis. Il est aussi possible de définir la fréquence d'échantillonnage voulue (indiquée par le champ "Rate") et la taille du buffer (ou tampon) exprimée en nombre d'échantillons (indiquée par le champ "Samples to read").

Ce buffer représente un espace de la mémoire vive RAM de l'ordinateur que nous allouons et qui est utilisé pour stocker les données acquises et transmises par le matériel d'acquisition NI à l'ordinateur avant qu'elles soient affichées et enregistrées. C'est le principe de fonctionnement des matériels d'acquisition en général : les données sont acquises par le matériel et transmises par la suite à l'ordinateur via un bus de communication (USB dans notre cas) puis elles sont placées dans une mémoire tampon d'où elles sont récupérées par la suite pour être utilisées par l'application (affichage, enregistrement ...) ceci est illustré par la Figure 6.1.

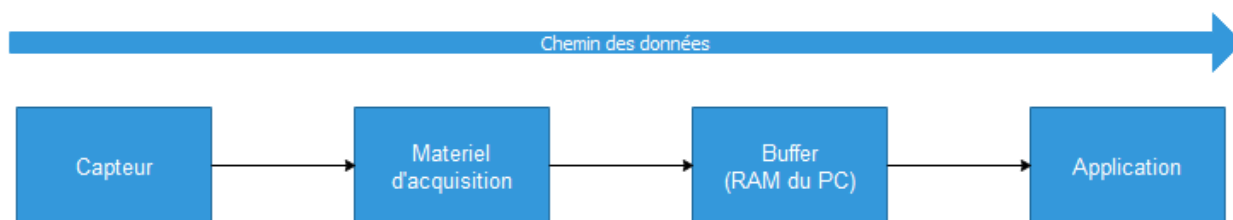


Figure 6.1 : Chemin parcouru par les données

6.2.3 Réalisation des tests de vérification

Une fois la première version du logiciel est bien réalisée et le dispositif d'essai étant mis en place, les essais débutent. Le signal d'essai consiste en deux signaux carrés d'amplitude 5Vpp et d'offset 2.5V (signaux variants entre 0V et 5V) avec un déphasage entre les deux de 90° et une fréquence qui sera modifiée d'un test à l'autre. Nous nous assurons également que les chaines CH1 et CH2 du générateur (délivrant des signaux similaires aux signaux A et B des capteurs) sont bien branchées aux compteurs encodeurs du matériel d'acquisition NI de façon à ce que ces deux compteurs reçoivent le même signal comme décrit dans le chapitre 5.

Pour les tests, nous sélectionnons les compteurs encodeurs 1 et 2 du matériel d'acquisition dans l'interface car ce sont les compteurs que nous utilisons pour ce test et pour tous les tests à venir tout le long de ce processus jusqu'à aboutir au programme adéquat. Pour le reste des réglages à faire, nous fixons le type de codage à X4, mais nous faisons varier la fréquence d'échantillonnage et la taille du Buffer d'un test à l'autre. Puis nous lançons le programme.

Nous réalisons des tests sur des signaux à une fréquence variant de 100kHz à 2MHz. Nous constatons à l'issue de ces tests que l'acquisition a bien été effectuée, les signaux étaient bien illustrés par les courbes dans le graphe et dans le tableau des mesures prises et les données sont bien enregistrées dans le fichier. Par conséquent, nous avons bien atteint l'objectif escompté par cette première version. Néanmoins, et comme prévu, les mesures prises des deux compteurs ne sont pas synchronisées. Il existe un gap inacceptable qui s'accroît au cours du temps entre les deux comptages. Ceci est illustré par la suite par les figures 17 et 18.

Ainsi, nous passons à l'amélioration de cette version du programme en vue d'atteindre la synchronisation recherchée en passant par plusieurs versions à travers lesquelles nous améliorons à chaque fois un aspect du programme, nous modifions les réglages ou nous utilisons une nouvelle

technique de synchronisation puis nous procédons à chaque fois à la réalisation des tests de vérification puis à l'analyse des résultats jusqu'à atteindre le programme idéal à l'issue de nombreuses versions. Nous ne détaillerons pas toutes les améliorations entreprises d'une version à une autre mais nous citons les deux techniques les plus importantes qui ont permis d'atteindre le programme adéquat.

6.2.4 Les techniques de synchronisation utilisées

Pour la synchronisation, plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu tels que : l'instant de début de prise des mesures, la fréquence d'échantillonnage, la vitesse de transfert des données vers le buffer via le bus de communication, certaines tâches qui pourraient s'avérer lentes au point de retarder l'acquisition tels que l'affichage et l'enregistrement des données.

Généralement, plusieurs techniques sont utilisées pour palier à ce genre de problème et synchroniser les mesures. Dans notre cas nous avons recourt à deux de ces techniques simultanément pour atteindre notre quête.

Le cadencement matériel [38]

Comme expliqué précédemment, la fréquence d'échantillonnage est un facteur important qui est défini par la vitesse à laquelle les échantillons sont prélevés et qui influe directement sur la synchronisation vue que cette fréquence doit être constante et stable au cours du temps et doit être exactement la même pour les deux compteurs encodeurs à tout moment tout le long de l'acquisition. Toute variation de sa valeur au cours du temps entraîne un gap entre les deux comptages et par conséquent la perte de la synchronisation.

La fréquence d'échantillonnage dépend d'un signal appelé signal d'horloge. En effet, cette fréquence ne peut pas excéder la fréquence du signal d'horloge et peut prendre des valeurs divisions de la fréquence de ce signal [39]. Si, par exemple, la fréquence du signal d'horloge est de 100 kHz alors la fréquence d'échantillonnage maximale possible est de 100 kHz et peut aussi être égale à une valeur division de 100 kHz. Ceci est illustré par la Figure 6.2 présentant un signal d'horloge et quelques fréquences d'échantillonnage (f_1 - f_5) possibles à partir de ce signal.

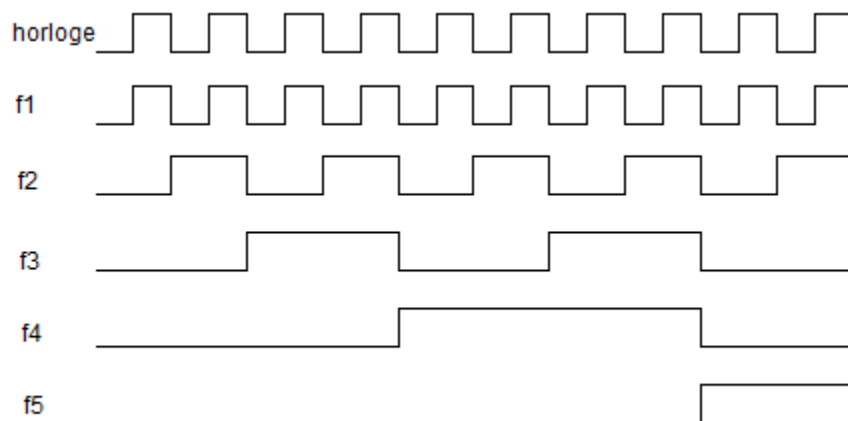


Figure 6.2 : fréquences d'échantillonnage dépendantes d'un signal d'horloge

Ce signal d'horloge peut être généré logiciellement. Dans ce cas, c'est l'ordinateur et plus précisément le système d'exploitation qui s'occupe de le générer. C'est ce qu'on appelle un cadencement logiciel où la fréquence d'échantillonnage est contrôlée logiciellement. Il est utilisé par défaut dans notre première version du programme. Ce cadencement est réputé pour être limité en termes de vitesse de stabilité et de précision ce qui influence directement la synchronisation. La solution est d'utiliser un cadencement matériel qui consiste à générer le signal d'horloge nous-même. Pour cela nous créons une nouvelle fonction dans notre programme permettant de générer un signal carré par l'un des compteurs mis à notre disposition par le matériel d'acquisition.

Dans l'interface de supervision un onglet est consacré à la configuration de ce signal d'horloge. L'onglet comporte trois champs :

- Le compteur à utiliser pour générer le signal d'horloge. Nous choisissons le compteur 0 du matériel d'acquisition pour notre application
- La fréquence du signal d'horloge
- Le duty cycle (Rapport cyclique en français) : qui représente le pourcentage du niveau haut par rapport à une période d'un signal carré. Dans notre cas nous gardons la valeur par défaut de 0.5 qui représente 50%.
- Le Idle State : qui est le niveau par défaut du signal que nous gardons à "Low" (Bas). C'est-à-dire que le signal d'horloge commence à l'état bas et y retourne à la fin de sa

génération. Ce cadencement matériel assure une fréquence d'échantillonnage plus stable, plus précise et pouvant atteindre des valeurs plus élevées.

Le Arm Start Trigger [40]

Une fois, le cadencement matériel mis en place, nous sommes certains qu'aucune différence ne sera créée entre les deux comptages pendant l'acquisition. Néanmoins, ceci ne veut pas, forcément, dire que les mesures sont synchronisées car si un gap est déjà existant au début de l'acquisition, il ne s'accroît pas mais il serait, quand même, conservé jusqu'à la fin.

Pour éviter ce genre de situations, il faut s'assurer que les deux compteurs commencent le comptage exactement au même instant. A la première version du programme nous avons placé les deux blocs fonctionnels, commandant le début des deux actions de comptages, dans la même boucle. Ceci s'est avéré insuffisant. Pour améliorer cela, et s'assurer que l'instant de début est le même pour les deux compteurs, nous utilisons un déclencheur qui donne le signal de départ aux deux actions d'acquisition. Ce déclencheur est communément appelé Arm Start Trigger. Pour cela une impulsion est suffisante puisque le déclenchement est effectué sur le premier front montant perçu par le Arm Start Trigger. Ce signal déclencheur doit être transmis à l'une des entrées numériques mises à notre disposition par le matériel d'acquisition. Cette entrée est sélectionnée dans le champ "Arm Start Trigger" de l'interface de supervision avant de lancer le programme. Pour générer l'impulsion requise pour le déclenchement nous branchons, sur l'entrée à utiliser, un simple générateur de tension continue stabilisée d'amplitude 5V acheté et branché sur l'une des entrées du module d'entrées/sorties numériques du matériel d'acquisition NI. Nous activons ce signal continu à chaque fois que nous voulons lancer l'acquisition. Ce n'est pas le signal continu qui est responsable du déclenchement mais plutôt le passage de l'état 0 (0V) à l'état 1 (5V).

Par conséquent, même après avoir bien configuré et lancé le programme, il reste en attente jusqu'à ce que l'entrée sélectionnée comme étant le déclencheur perçoive un signal. Ce qui donne le feu vert au début des acquisitions.

Pour notre application nous utilisons l'entrée 7 en y branchant le générateur de tension continue 5V pour jouer le rôle du Arm Start trigger vue qu'elle n'est nécessaire à aucun des compteurs que nous utilisons.

6.2.5 La version finale du programme

Le programme et l'interface ont été conçus et réalisés en parallèle (simultanément) ce qui est le cas pour la plupart des programmes Labview. Puisque chaque changement (ou modification) apporté à l'un affecte directement l'autre. Ils sont directement liés. La version finale de notre programme est illustrée à l'annexe H alors que l'interface de supervision est présentée à l'annexe I avec le paramétrage optimal qui nous permet d'obtenir les meilleurs résultats. Ce paramétrage est déterminé en modifiant les divers paramètres (fréquence d'échantillonnage, taille du buffer ...) d'un test à l'autre et en analysant les résultats.

6.2.6 Analyse des résultats de tests réalisés avec certaines versions du programme

Les données acquises et enregistrées dans le fichier résultat sont analysées à la suite de chaque test. Chaque fichier contient deux colonnes de données dont chacune correspond aux mesures de l'un des deux capteurs. Ces mesures sont ordonnées en fonction du temps. Toute mesure du premier capteur correspond à celle en face d'elle (du deuxième capteur). Un exemple d'une partie d'un fichier résultat est présenté dans l'annexe J. Ce fichier est issu d'un test réalisé avec la version finale de notre programme, obtenu avec la configuration présentée à l'annexe I. Le fichier est trop volumineux pour être présenté en totalité.

Pour s'assurer de la synchronisation des deux acquisitions, il faut que chaque mesure de la première colonne soit exactement la même que la mesure de la deuxième colonne qui lui correspond vue que les deux compteurs perçoivent le même signal.

Au cours du processus, pour certain cas et en utilisant certaines des versions non optimisées du programme telles que la version initiale, la synchronisation était loin d'être atteinte et il était assez simple de s'en apercevoir juste en ouvrant le fichier résultat comme un fichier texte ordinaire et en inspectant les données qu'il contient. Ceci est illustré dans l'annexe K. À première vue la différence entre les éléments des deux colonnes était claire. Mais au fur et à mesure que nous améliorons le programme et que nous développons de nouvelles versions, nous nous approchons petit à petit de la synchronisation et les différences entre les mesures des deux compteurs deviennent moins élevées et moins fréquentes et par conséquent moins faciles à déceler. Ainsi, pour mieux analyser

les résultats plus en détail, mesure par mesure pour s'assurer s'ils sont bien synchronisés, nous avons recouru à des scripts développés en utilisant le logiciel Matlab. Nous cherchons à mettre en évidence toute différence existante entre les deux colonnes de mesure des fichiers résultats des tests. Pour cela, et pour chaque test, nous affichons les deux courbes d'évolution des deux signaux en fonction du temps dans un premier graphe et nous affichons la différence entre les deux signaux au cours du temps dans un deuxième graphe.

Nous présentons les analyses des résultats de tests réalisés avec certaines versions du programme pour mettre en évidence les améliorations apportées afin d'aboutir à la version finale assurant la synchronisation recherchée.

6.2.6.1 Version initiale

Pour la version initiale du logiciel, une simple inspection visuelle du fichier résultat présenté dans l'annexe K, révèle que les différences entre les deux comptages sont flagrantes. Ce diagnostic est confirmé par le graphe d'évolution des deux comptes au cours du temps présenté à la Figure 6.3 ainsi que le graphe de l'évolution de la différence entre eux au cours du temps illustré par la Figure 6.4.

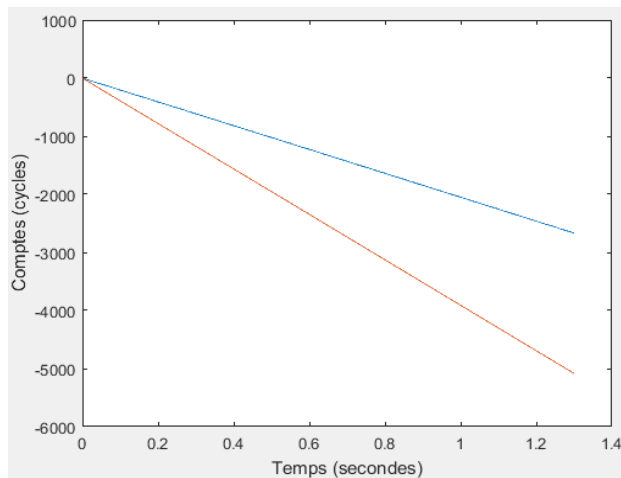


Figure 6.3 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test avec la version initiale du programme

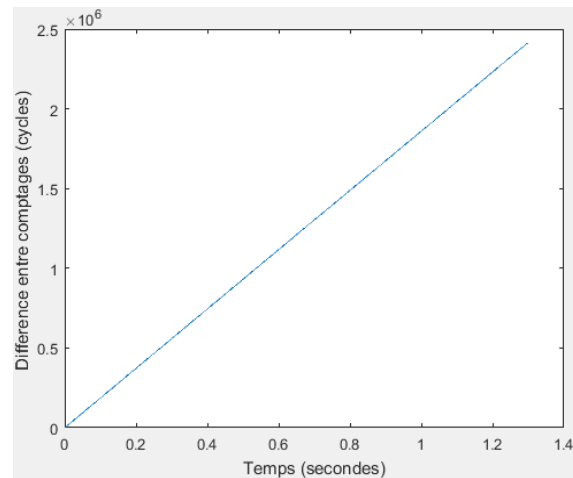


Figure 6.4 : Différences entre les comptes pour un test avec la version initiale du programme

Nous constatons que les comptages sont différents et dérivent l'un de l'autre causant un gap qui s'accroît au cours du temps.

6.2.6.2 Version intermédiaire 1

Les résultats des tests avec une autre version améliorée sont montrés aux figures 6.5 et 6.6.

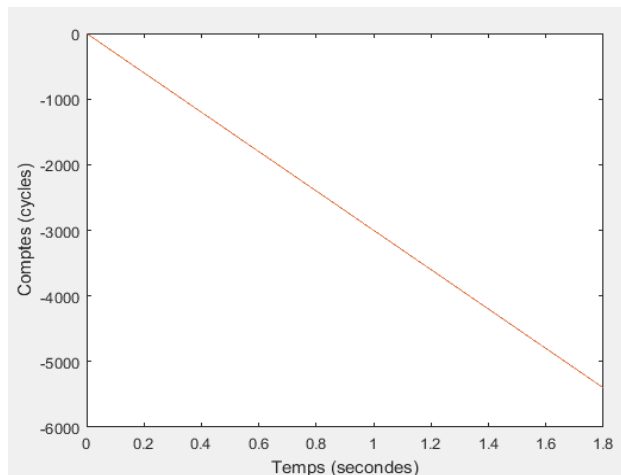


Figure 6.5 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test avec une version intermédiaire 1 du programme

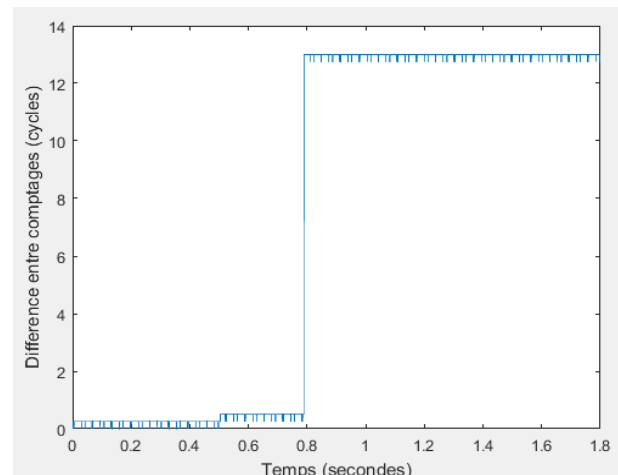


Figure 6.6 : Différences entre les comptes pour un test avec une version intermédiaire 1 du programme

Pour atteindre cette version, plusieurs améliorations ont été apportées tels que la modification de certains blocs fonctionnels, leurs paramétrages et leurs emplacements. Nous constatons que les courbes de la figure 6.5 décrivant l'évolution des comptages au cours du temps des deux compteurs sont presque superposées et que le gap n'est plus aussi perceptible qu'avec la version précédente. Néanmoins, cela ne veut pas dire pour autant que l'acquisition est synchronisée. Ainsi nous ne pouvons plus nous fier à ce genre de graphe. En effet, à partir de la courbe de la figure 6.6 décrivant l'évolution de la différence des comptes au cours du temps nous remarquons que des sauts considérables se produisent et se manifestent par une différence soudaine impliquant que la synchronisation n'est pas atteinte.

6.2.6.3 Version intermédiaire 2

Cette nouvelle version implémente d'autres techniques de synchronisation notamment le cadencement matériel cité précédemment. Cette technique consiste à générer nous même le signal d'horloge qui sera utilisé par les deux compteurs grâce à un troisième compteur du matériel d'acquisition. Ceci permet d'avoir un signal d'horloge plus précis et pouvant atteindre des fréquences bien plus élevées que celui généré logiciellement par défaut par l'ordinateur. En réalisant des tests, les résultats s'améliorent. Ceci est illustré par la Figure 6.7 qui met l'accent sur la différence existante entre les comptages au cours du temps.

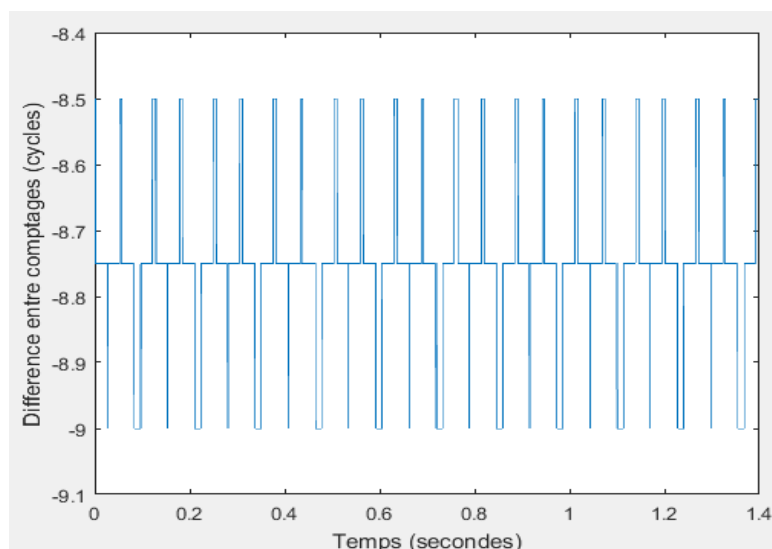


Figure 6.7 : Différences entre les comptes pour un test avec une version intermédiaire 2 du programme

Nous constatons que le saut n'existe plus et que la différence est presque constante au cours du temps. Mais cela ne signifie pas pour autant que notre objectif est atteint. En effet cette différence vaut -8.75 ± 0.25 cycles. Nous ne pouvons pas tolérer une différence aussi élevée ce qui signifie que le programme n'est pas encore au point. Il semblerait que l'acquisition des deux compteurs ne soit pas déclenchée simultanément puisque la différence est existante depuis le début des acquisitions.

6.2.6.4 Version finale

Pour pallier au problème de déclenchement de la version précédente du programme, nous utilisons le Arm Start Trigger qui est l'une des techniques de synchronisation citées précédemment et qui permet de déclencher les acquisitions par un signal externe. En effet, pour s'assurer que l'acquisition se déclenche exactement au même instant pour les deux compteurs, nous ajoutons un déclencheur assuré par un signal 5V continu venant d'un générateur de tension stabilisée 5V et relié à l'une des entrées du module d'entrées/sorties numériques du matériel d'acquisition. Cette entrée est configurée dans l'interface de supervision en tant que déclencheur. À chaque test il faut activer le générateur pour commencer l'acquisition. C'est le passage de l'état 0 (0V) à l'état 1 (5V) qui provoque le début de l'acquisition et non pas le signal continu 5V en lui-même. Ce qui nous permet finalement d'atteindre notre objectif. Ceci est illustré dans la Figure 6.8.

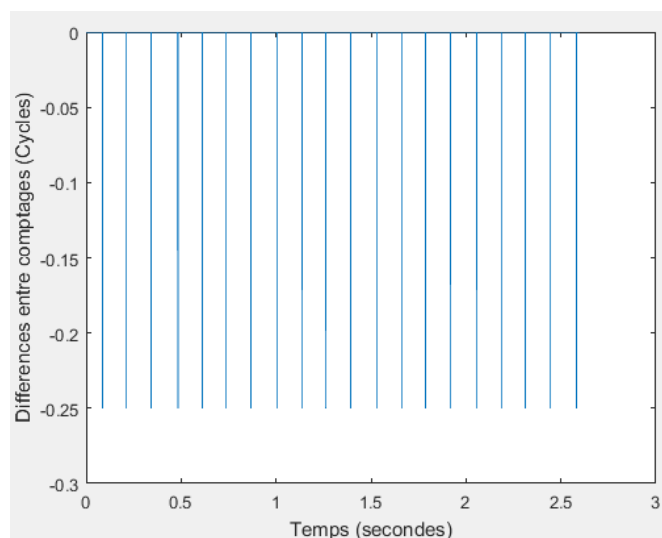


Figure 6.8 : Différences entre les comptes pour un test avec une version finale du programme

En effet, nous remarquons que l'acquisition des deux compteurs se déclenche simultanément et que les différences entre les comptes se limitent à 0 ± 0.25 cycles que nous estimons être tolérables pour notre application.

Ainsi, grâce à cette version développée et après avoir déterminé le paramétrage optimal de l'interface de supervision présentée dans l'annexe I, nous pouvons affirmer que nous avons atteint une synchronisation à un quart de cycle près et nous pouvons réaliser les mesures sur la machine avec une précision d'un quart de cycle. La valeur de cette précision dépend de la résolution de mesure. Ainsi, elle correspond à $0.5 \mu\text{m}$ pour l'encodeur et à 0.79 nm pour le laser.

Un schéma bloc simplifié de cette version finale est présenté à la Figure 6.9.

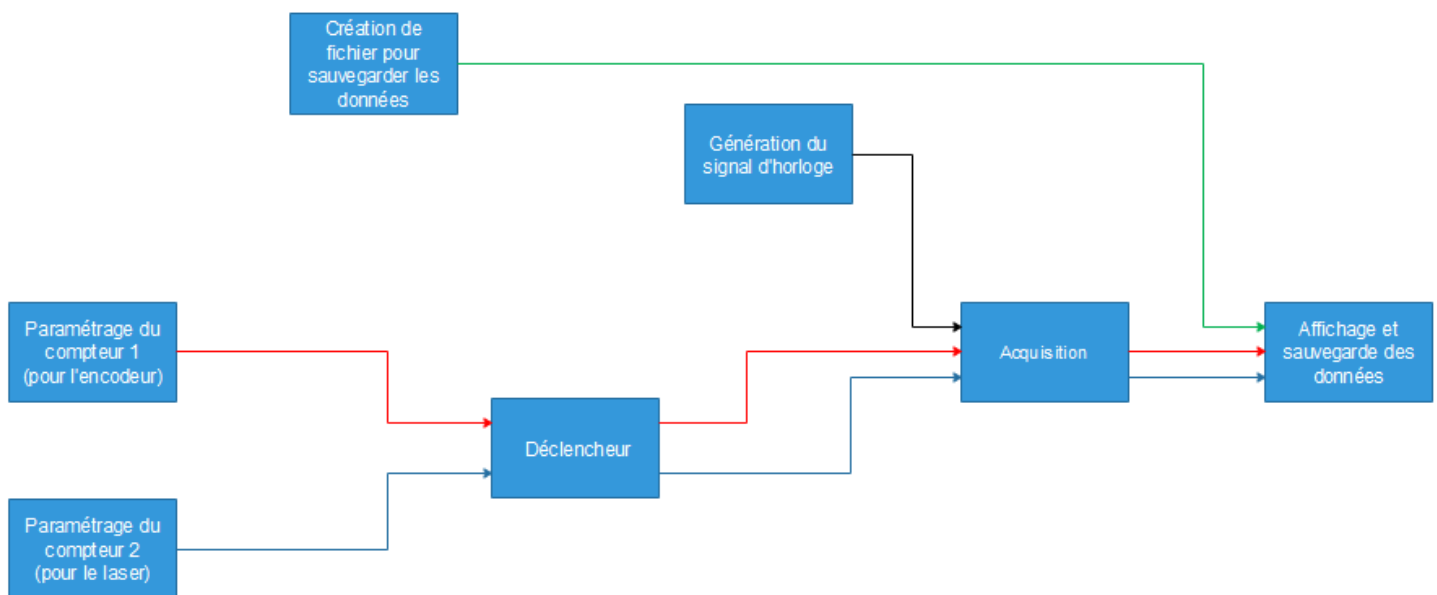


Figure 6.9 : schéma bloc simplifié de la version finale du programme

CHAPITRE 7 RÉALISATION DES TESTS ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Une fois la synchronisation atteinte entre les acquisitions des deux compteurs, les essais sur la machine sont réalisés. Avant cela nous nous devons de réaliser des tests de confirmation de deux types. Les premiers pour s'assurer que la synchronisation est encore valide avec notre système de mesure aussi bien qu'avec le générateur de tension. Les deuxièmes tests pour s'assurer que les mesures acquises concordent avec celles mesurées par le logiciel de Renishaw. Pour pouvoir finalement procéder aux tests comparant la position de l'outil vue par l'encodeur à sa position réelle mesurée par l'interféromètre.

7.1 Confirmation de la synchronisation avec l'interféromètre

A travers ces tests nous cherchons à nous assurer que la synchronisation atteinte précédemment en utilisant un générateur de tensions est aussi bien valide avec l'interféromètre. Ainsi nous suivons le même principe que les tests de synchronisation en injectant le même signal aux deux compteurs mais cette fois au lieu d'utiliser le signal du générateur, nous utilisons celui de l'interféromètre.

Par conséquent, nous utilisons le même système utilisé pour les tests de synchronisation et illustré par la

Figure 5.1 sauf que nous remplaçons le générateur de tension par l'interféromètre que nous mettons en place de façon à pouvoir réaliser les mesures linéaires selon l'axe Y comme illustré à la Figure 4.5 où l'interféromètre et le rétro réflecteur de référence sont fixés sur la broche (porte outil) alors que le rétro réflecteur de mesure est placé, via un support, sur la table mobile de la machine qui se déplace seulement selon l'axe Y durant tous les tests. Cette installation est illustrée à la Figure 7.1.

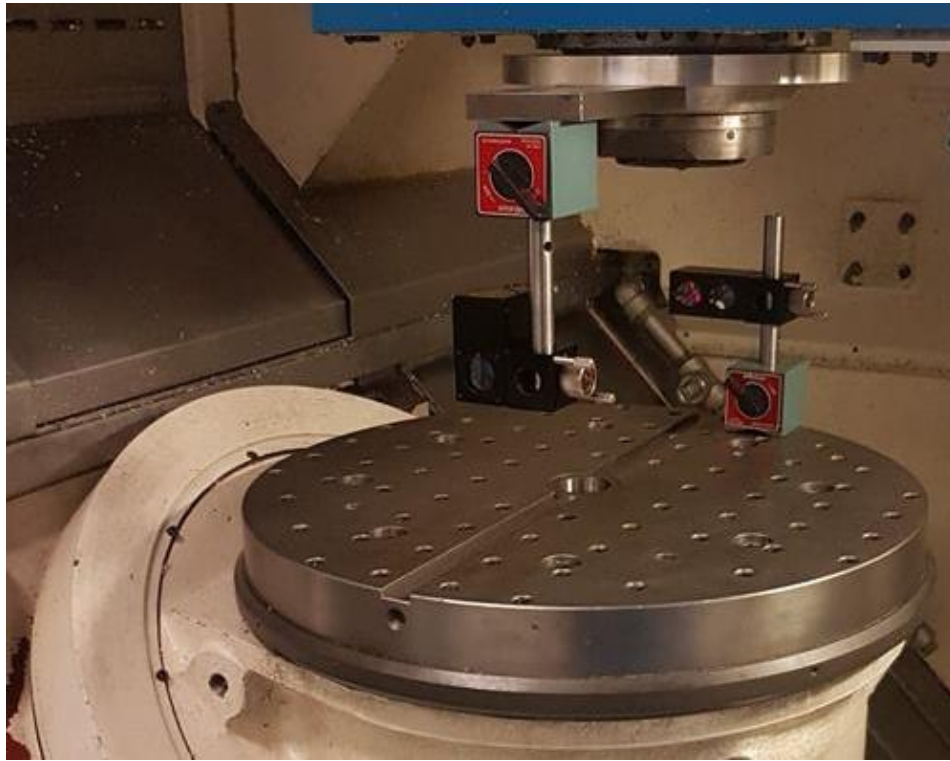


Figure 7.1 : Installation de l'interféromètre sur la machine

Pour les tests nous programmons un mouvement d'un aller-retour selon l'axe Y sur tout l'intervalle de mouvement possible avec un arrêt de 1 seconde à l'extrémité. C'est-à-dire un aller de 0 à -700 mm puis arrêt d'une seconde puis retour de -700 à 0 mm, et ce, à quatre vitesses différentes (2500, 5000, 7500 et 10000 mm/min). Pour chaque vitesse nous réalisons cinq tests. Nous affichons les courbes d'évolution des comptes tels qu'illustré dans la figure 7.2 et celle de la différence entre ces comptes en fonction du temps dans la figure 7.3. Ces deux figures concernent un test effectué à une vitesse de 10000 mm/min.

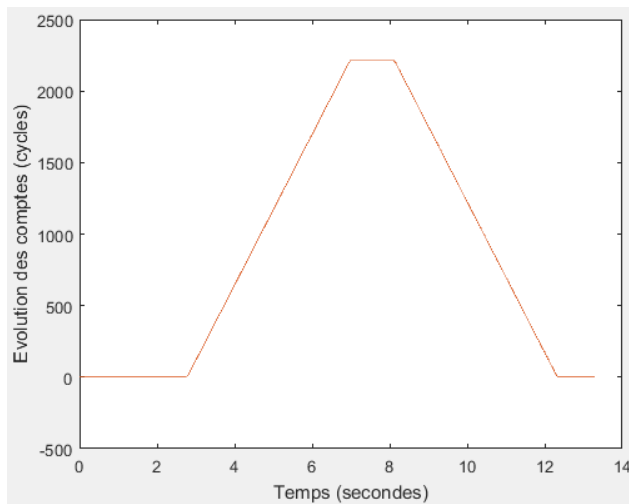


Figure 7.2 : Évolution des comptes des deux compteurs pour un test de confirmation de synchronisation avec interféromètre

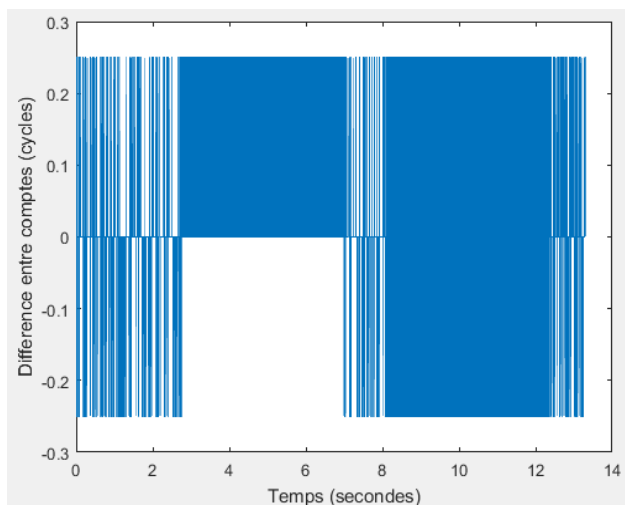


Figure 7.3 : Différences entre les comptes pour un test de confirmation de synchronisation avec interféromètre

En se basant sur la figure 7.3 nous constatons que la différence entre les comptes varie de 0 ± 0.25 cycle. Ce qui concorde bien avec les résultats trouvés lors des tests de synchronisation et confirme la présence d'une synchronisation suffisante et la validité de cette version du programme pour les tests sur la machine.

7.2 Mise en place

Le système d'acquisition à mettre en place pour la réalisation des tests de comparaison entre la position de l'outil à l'encodeur et sa position réelle est le système conçu précédemment dans les chapitres 3 et 4 et décrit par la Figure 7.4.

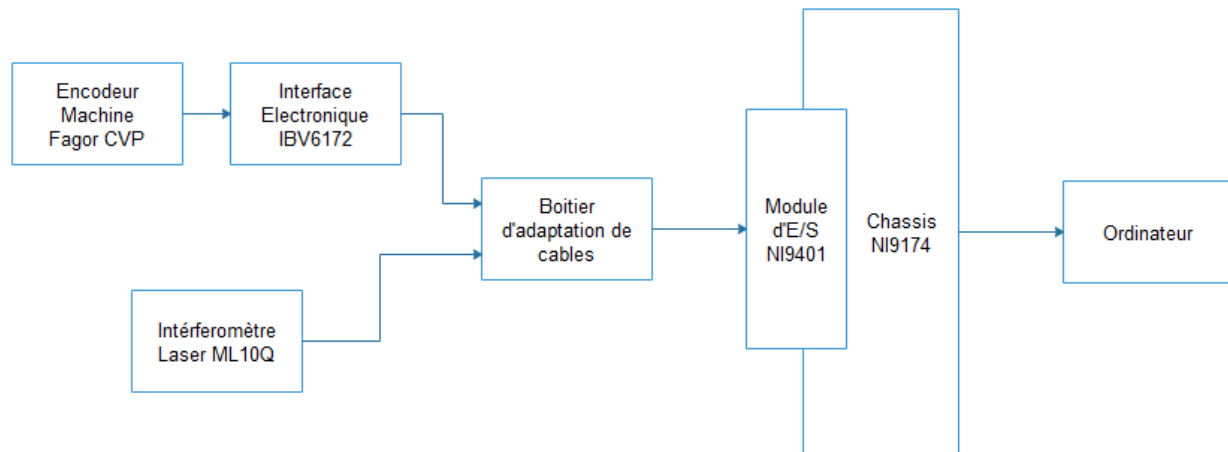


Figure 7.4 : Système d'acquisition complet

L'encodeur et l'interface électronique IBV 6172 sont déjà installés sur la machine. De même pour l'interféromètre qui est déjà en place depuis les tests précédents et pour lequel nous gardons la même installation.

D'un autre côté, vu que les deux câbles de l'interféromètre et de l'interface électronique IBV ne sont pas compatibles au port Dsub 25 de NI, un boîtier d'adaptation des câbles a été conçu et mis en place. Il comporte des ports pour brancher les deux câbles des deux capteurs à l'entrée et fournit à sa sortie un câble Dsub 25 à brancher directement sur le matériel NI. Ceci est illustré dans la Figure 7.5.

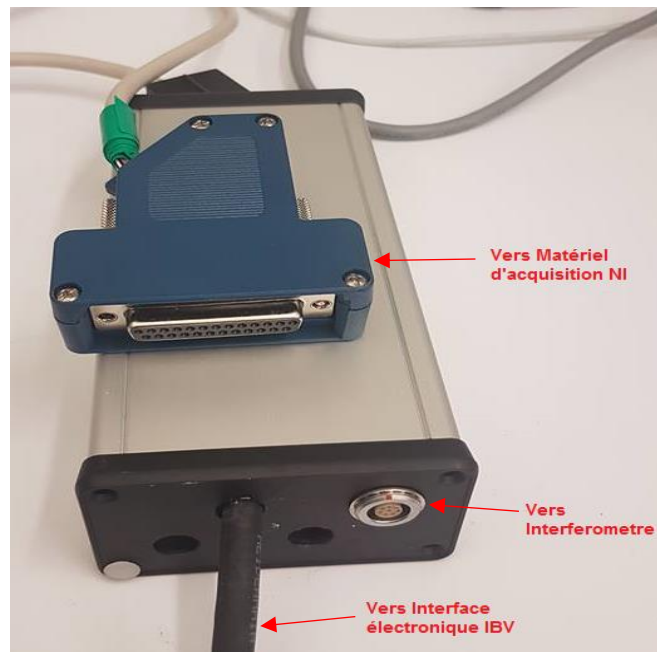


Figure 7.5 : Boitier d'adaptation de câbles

En ce qui concerne le signal de déclenchement des acquisitions, nous gardons la même installation utilisée dans les tests de synchronisation en injectant un signal d'une alimentation de 5V continue dans l'entrée du matériel d'acquisition à utiliser comme Arm Start Trigger en utilisant l'adaptateur du port Dsub 25 en bornier à vis précédemment utilisé et illustré par la Figure 5.4. Ceci est expliqué plus en détail dans le paragraphe 6.2.4 Les techniques de synchronisation utilisées.

7.3 Confirmation de l'exactitude de nos mesures

Pour nous assurer que les acquisitions que nous effectuons sont exactes, nous réalisons des tests pour comparer les mesures de l'interféromètre prises par nos moyens à celles prises par le système d'acquisition de l'interféromètre lui-même et affichées par le logiciel de Renishaw. Durant ce test nous nous focalisons uniquement sur l'interféromètre et nous ne tenons pas compte des mesures de l'encodeur de la machine. Ce test est réalisé en régime quasi-statique. Nous programmons la même trajectoire adoptée pour les tests précédents c'est-à-dire un aller-retour, selon l'axe Y uniquement, sur tout l'intervalle disponible sauf que cette fois nous programmons un arrêt de 3 secondes tous les 100 mm pour pouvoir prendre les mesures en statique. Nous réalisons le test trois fois à une vitesse de 7500 mm/min et trois fois à une vitesse de 10000 mm/min. L'évolution des mesures prises par notre matériel d'acquisition au cours du temps pendant un test est illustrée par la Figure 7.6.

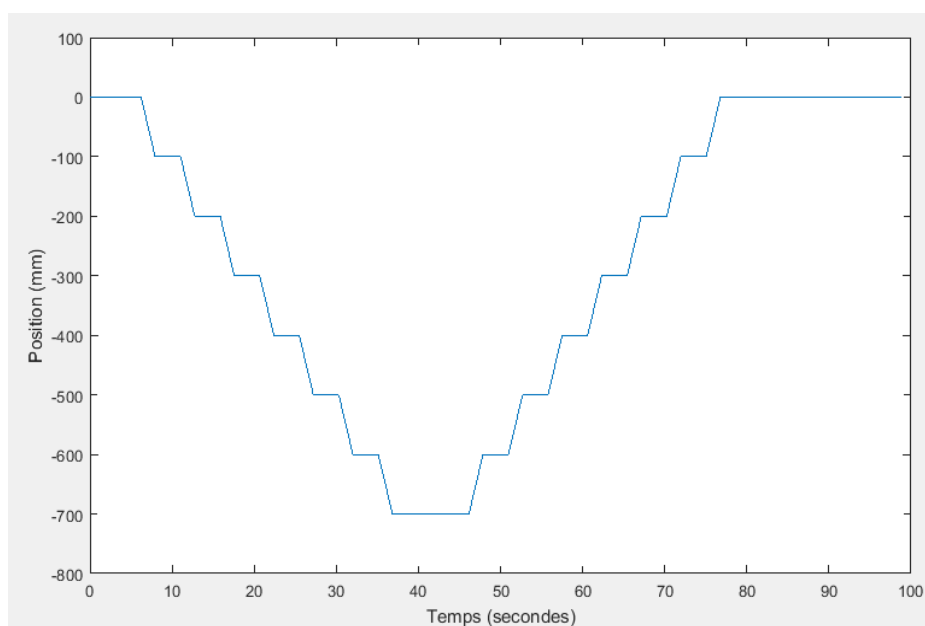


Figure 7.6 : Évolution des acquisitions du matériel NI au cours du temps

Les résultats de l'un des tests sont répertoriés dans le Tableau 7.1 qui englobe les erreurs déduites des mesures prises par les deux dispositifs (Matériel d'acquisition NI et matériel d'acquisition Renishaw) lors des deux tests. En sachant que : $\text{Erreur} = \text{Mesure acquise} - \text{consigne}$.

Tableau 7.1 : Résultats d'un test de confirmation réalisé à une vitesse de 10000 mm/min

Consigne (mm)	erreur NI (μm)	erreur renishaw (μm)	NI-Renishaw (μm)
0	0,00000	0	0,000000
-100	1,79922	1,8	-0,000783
-200	-0,67309	-0,7	0,026907
-300	-1,08874	-1,1	0,011258
-400	2,13432	2,1	0,034318
-500	4,48725	4,5	-0,012748
-600	3,67609	3,7	-0,023909
-700	3,18134	3,2	-0,018660
-700	3,33954	3,3	0,039545
-600	3,51789	3,5	0,017886
-500	4,64546	4,6	0,045456
-400	2,37162	2,4	-0,028375
-300	-1,16784	-1,2	0,032156
-200	-0,98950	-1	0,010498
-100	1,40371	1,4	0,003705
0	0,00000	0	0,000000

Pour mieux les analyser, nous présentons ces résultats à la Figure 7.7 illustrant l'évolution de la différence entre l'erreur acquise par NI et celle acquise par Renishaw en fonction de la consigne durant l'aller et le retour.

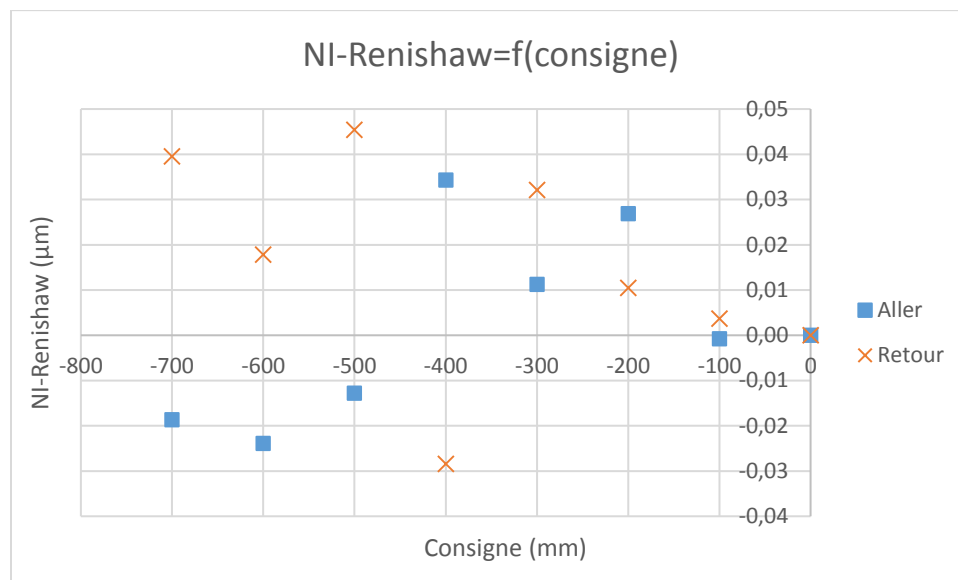


Figure 7.7 : différence entre erreur NI et erreur Renishaw en fonction de la consigne

Nous constatons en se basant sur la Figure 7.7 que la différence entre les mesures acquises par notre matériel d'acquisition NI et celles acquises par le matériel d'acquisition de l'interféromètre Renishaw varient entre -0.05 et $0.05 \mu m$. Cette différence est considérée comme étant acceptable vue que notre précision de mesure vaut $0.079 \mu m$. Néanmoins, elle est simplement explicable par l'arrondi des mesures effectué par le logiciel de Renishaw. En effet, comme le montre le Tableau 7.1 les mesures prises par Renishaw sont affichées à un seul chiffre après la virgule ce qui explique bien la différence de $\pm 0.05 \mu m$ constatée entre les acquisitions de NI et celle de Renishaw. Ceci est confirmé par l'annexe L présentant les mêmes résultats présentés Tableau 7.1 et de la Figure 7.7 mais en faisant un arrondi à un seul chiffre après la virgule des valeurs acquises par NI. Nous constatons que la différence est désormais nulle et que les acquisitions sont exactement les mêmes avec NI ou Renishaw. Cette constatation est aussi bien valable pour le reste des six tests réalisés et avec les deux vitesses. Par conséquent, les acquisitions que nous effectuons sont correctes.

7.4 Les tests de comparaison

7.4.1 Réalisation des tests

Maintenant, nous sommes en mesure de réaliser les tests de comparaison de la position réelle de l'outil et celle à l'encodeur de la machine puisque le système d'acquisition requis est bien conçu et mis en place et son aptitude à réaliser sa tâche a bien été validée en confirmant la bonne synchronisation entre les mesures prises et l'exactitude des acquisitions.

Pour ce faire, nous adoptons la même procédure des tests précédents. En effet, nous programmons un mouvement d'aller-retour selon l'axe Y sur tout le domaine disponible avec un arrêt d'une seconde à l'extrémité. Plus concrètement, lors de chaque test la table de la machine se déplace de la position 0 mm à la position -700 mm puis marque un arrêt d'une seconde avant de revenir de la position -700 à la position 0 mm. Nous réalisons des tests à quatre vitesses d'avance différentes (2500, 5000, 7500, 10000 mm/min) en vue d'observer les effets de la vitesse sur le positionnement de l'outil. Nous effectuons trois tests pour chaque vitesse afin de confirmer la répétabilité des résultats.

Nous réalisons aussi des tests en quasi-statique sur la même trajectoire adoptée pour les tests dynamiques mais avec un pas de 25 mm. Ceci nous permettrait de comparer les résultats obtenus en régime dynamique aux résultats qu'on trouverait en effectuant des mesures quasi-statiques conventionnelles. Les mesures quasi-statiques sont acquises par le logiciel de l'interféromètre Renishaw aux mêmes vitesses choisies pour les tests dynamiques et à raison de trois tests par vitesse.

Nous alternons les tests dynamiques et quasi-statiques pour que par la suite chaque couple de résultats (dynamique et quasi-statiques) soient observées ensemble.

Lors de tous ces tests, Nous avons demandé aux techniciens de désactiver les tables de compensation de la machine, ce qui a, probablement, été convenablement effectué sachant que la mesure de l'encodeur correspond à la commande notamment à -700mm.

7.4.2 Observation des résultats

A partir de la Figure 7.8 illustrant les deux courbes d'évolution des mesures de l'interféromètre et de l'encodeur au cours du temps pour l'un des tests réalisés en dynamique, il est difficile de distinguer les différences entre les mesures. Les deux courbes sont presque superposées.

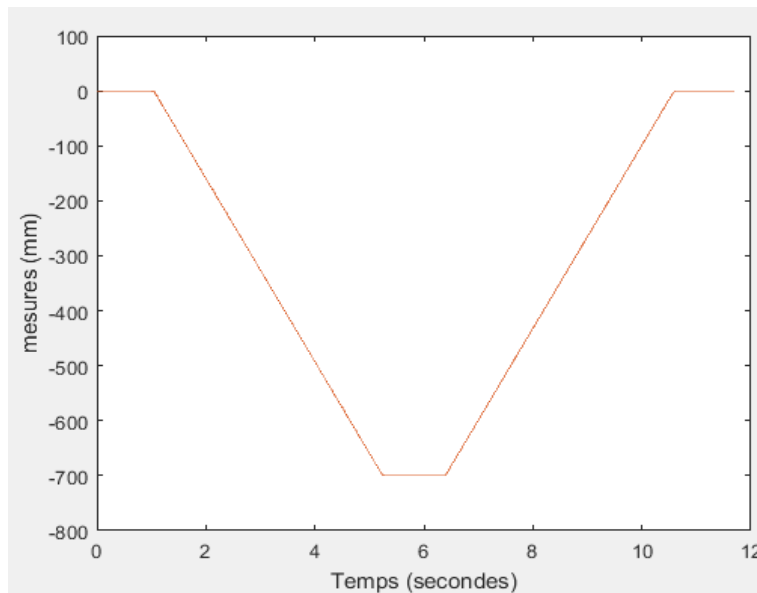


Figure 7.8 : courbes d'évolution des mesures avec interféromètre et encodeur pour un test dynamique

Pour mieux observer les résultats des tests en vue de détecter les erreurs et déceler les anomalies qui se manifestent en régime dynamique, nous affichons la courbe d'évolution de la différence entre les mesures de l'interféromètre et celles de l'encodeur au cours du temps ce qui nous donne la courbe d'évolution de l'erreur au cours du temps. Sur cette courbe nous superposons les erreurs détectées lors du test en quasi-statique réalisés avec Renishaw dans les mêmes conditions. Le recalage des deux essais (dynamique et quasi statique) est réalisé en se basant sur la lecture encodeur.

Un exemple de ce graphique pour l'un des tests réalisés à une vitesse de 10000 mm/min est illustré par la Figure 7.9.

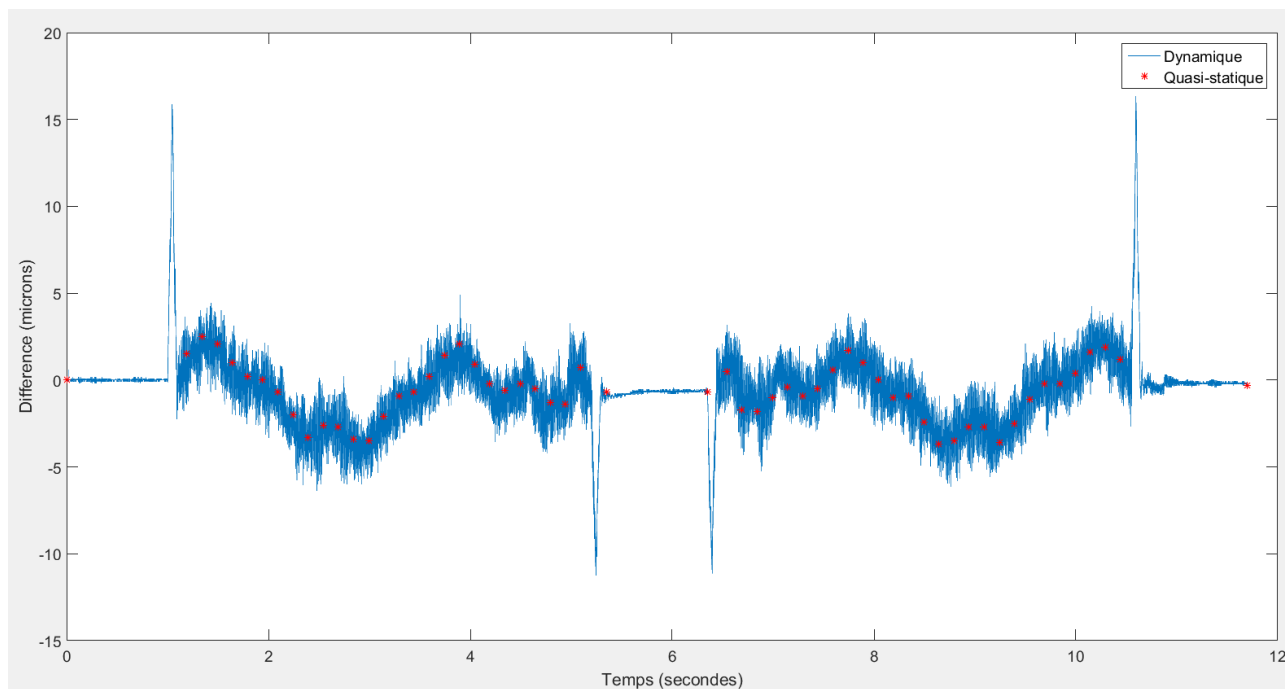


Figure 7.9 : Évolution de l'erreur de la machine au cours du temps en régime dynamique et quasi-statique

En se basant sur la Figure 7.9, il est clair que les mesures dynamiques dégagent beaucoup plus de détails et d'informations sur le comportement et l'état de la machine pendant son fonctionnement que les mesures statiques.

Nous constatons la présence d'un pic au début et à la fin de chaque mouvement qui est probablement causé par l'effet de l'accélération et de la décélération. D'un autre côté, nous remarquons des fluctuations de quelques micromètres lors du mouvement de la machine. Ces fluctuations pourraient être causées par des effets de vibrations.

Les effets dynamiques constatés (pics et fluctuations) sont impossibles à détecter par un étalonnage quasi statique conventionnel. D'où l'utilité et l'importance des mesures en dynamique. En revanche, il est clair que les deux courbes (dynamique et quasi-statique) ont la même allure ce qui confirme l'exactitude de nos acquisitions dynamiques.

Les courbes d'évolution de l'erreur au cours du temps sont similaires d'un test à l'autre. Elles ont toutes la même allure. Par conséquent il est difficile de déceler l'effet de la vitesse sur le comportement dynamique de la machine juste en visualisant ces courbes. Donc nous réalisons un zoom sur la zone de début du mouvement de la machine incluant le pic de début. Cette zone est

montrée par la Figure 7.10. Ce graphe est illustré par la Figure 7.11 pour quatre tests à quatre vitesses différentes.

En se basant sur la Figure 7.11, il est clair que les effets dynamiques s'accroissent en augmentant la vitesse d'avance. En effet, en ce qui concerne les pics, ils sont de plus en plus élevés en termes d'amplitude et de durée lorsque la vitesse augmente.

D'un autre côté, nous remarquons, à l'issue des pics que les fluctuations sont aussi plus élevées en termes d'amplitude lorsque la vitesse est plus élevée.

Nous nous contentons, à ce stade, d'une simple observation des traits saillants des résultats obtenus sans chercher à comprendre ou à expliquer les comportements observés et leurs origines. Ces résultats seront exploités convenablement dans une prochaine étape visant à modéliser le comportement dynamique de la machine.

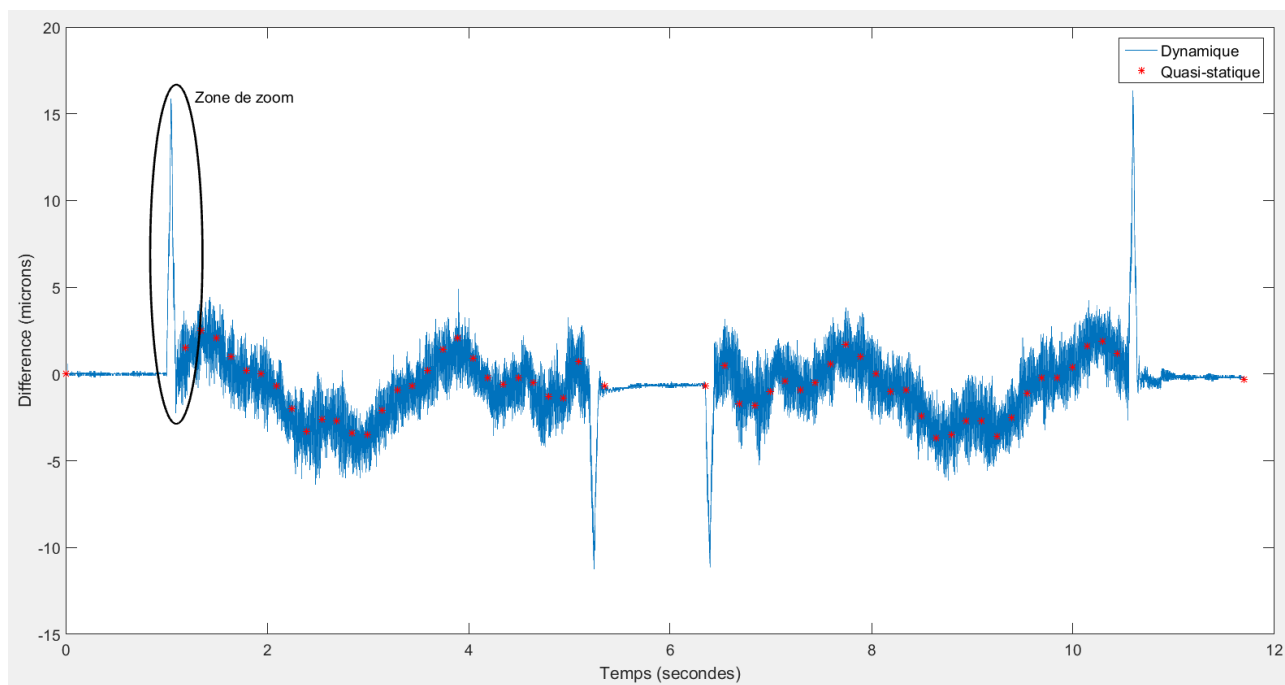


Figure 7.10 : zone de zoom

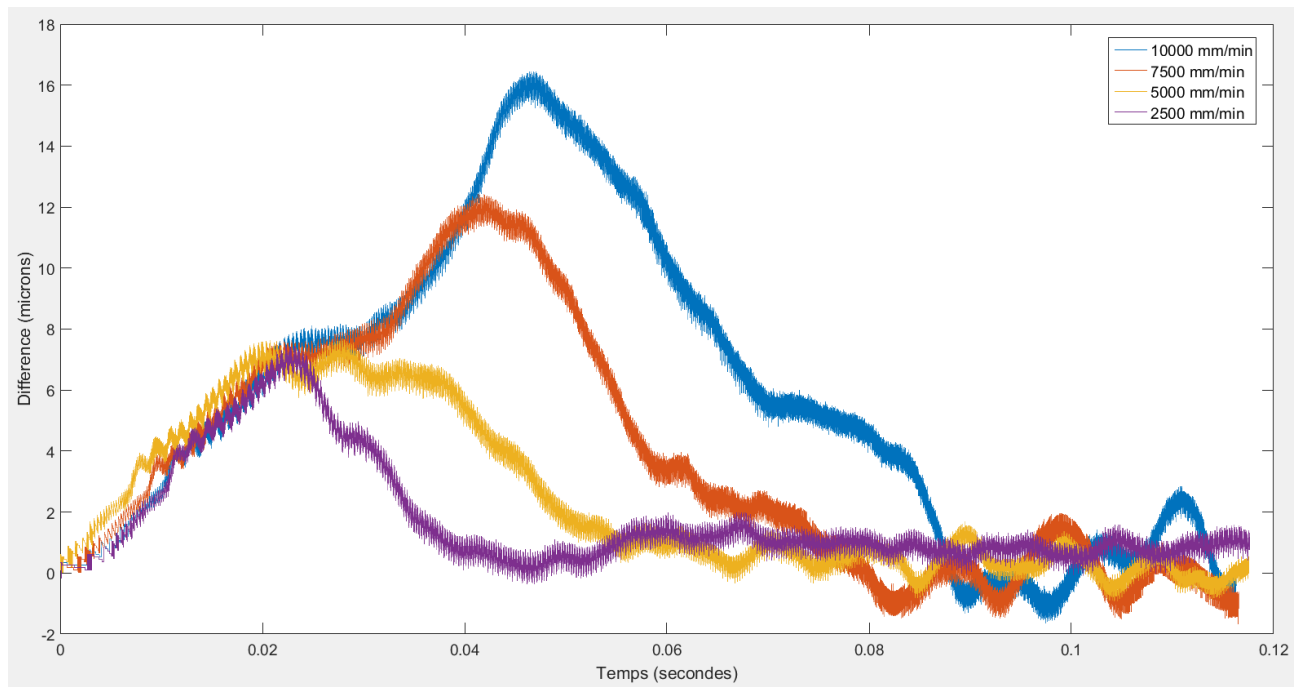


Figure 7.11 : Effet de la vitesse sur le comportement dynamique de machine pour un mouvement sur l'axe Y

CHAPITRE 8 CONCLUSION

Nous avons réussi à concevoir et mettre en place un système pour la comparaison de la position de l'outil vue par l'encodeur de la machine et sa position réelle mesurée par un interféromètre. Ce système permet de réaliser l'acquisition des deux mesures de la position de l'outil d'une MOCN cinq axes simultanément et en régime dynamique.

Cette technique d'acquisition en régime dynamique présente plusieurs avantages, comparée à un étalonnage conventionnel basé sur des mesures quasi statiques. D'une part, elle permet de réduire le temps de prise des mesures considérablement. D'autre part, elle assure une densité de mesures beaucoup plus élevée grâce à une fréquence d'échantillonnage largement supérieure (500kHz) ce qui implique une quantité d'information plus importante et par la suite un étalonnage de meilleure qualité ne négligeant aucun détail. D'un autre côté, ces mesures sont prises en mode dynamique. C'est-à-dire pendant le mouvement de l'outil ou de la table de la machine, ce qui est beaucoup plus représentatif du fonctionnement normal de la MOCN et permet de tenir compte de tous les effets dynamiques qui pourraient se manifester uniquement lors d'un mouvement et qui sont impossibles à détecter avec un étalonnage conventionnel reposant sur des mesures quasi—statiques.

Le système mis en place, à partir de l'instrumentation disponible au laboratoire LRFV, est capable de réaliser des acquisitions de deux mesures simultanément et à une fréquence d'échantillonnage maximale de 500 kHz et avec une synchronisation à un quart de cycle près. Ce que nous avons considéré comme étant correct et acceptable pour notre application. En revanche, pour d'autres applications futures requérant l'acquisition de plus de deux mesures, ou une fréquence d'échantillonnage plus élevée ou une meilleure synchronisation, nous recommandons de remplacer le matériel d'acquisition "CompactDAQ" utilisé actuellement par un matériel d'acquisition de la gamme PXIe de meilleures performances.

Les tests réalisés grâce au système mis en place ont permis d'inspecter l'état de l'axe Y de la machine lors de son fonctionnement. La valeur ajoutée de cette application se manifeste par les traits et les aspects observés grâce à ces tests en dynamiques et qu'on ne soupçonnerait même pas avec les mesures quasi-statiques sans oublier la rapidité de la prise des mesures.

Les résultats obtenus à l'issue des tests réalisés ainsi que d'autres résultats qu'on obtiendrait en réalisant des tests complémentaires par la même technique et avec le même système peuvent être exploités par la suite pour modéliser le comportement de la machine pendant son mouvement ce qui est beaucoup plus fidèle, représentatif et pertinent qu'une modélisation basée sur des mesures quasi-statiques acquises lorsque la machine est à l'arrêt.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Barlier, *Industrialisation & mécanique: usinage des matériaux métalliques*: Casteilla, 2011.
- [2] P. Joshi, *Machine Tools Handbook*: McGraw-hill, 2007.
- [3] D. Dornfeld and M. M. Helu, *Precision Manufacturing*: Springer US, 2007.
- [4] S. Zargarbashi and J. R. R. Mayer, "Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Capball sensor," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 759-766, 2009.
- [5] M. Tsutsumi and A. Saito, "Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 1333-1342, 2004.
- [6] J. Cauvier, "Amélioration de la prédiction de la capacité des centres d'usinage à têtes multiples," École de technologie supérieure, 2011.
- [7] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, "Geometric error measurement and compensation of machines—an update," *CIRP Annals*, vol. 57, pp. 660-675, 2008.
- [8] J. S. Chen, T. W. Kou, and S. H. Chiou, "Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer," *Precision Engineering*, vol. 23, pp. 243-252, 1999.
- [9] Y. Abbaszadeh-mir, "Étalonnage Géométrique des machines-outils par barre à billes en vue de prédire leur performance," 2002.
- [10] P. Schellekens, N. Rosielle, H. Vermeulen, M. Vermeulen, S. Wetzels, and W. Pril, "Design for precision: current status and trends," *Cirp Annals*, vol. 47, pp. 557-586, 1998.
- [11] J. R. R. Mayer, "MEC8552 - Métrologie Industrielle," ed, communication personnelle, Septembre 2016.
- [12] T. O. Ekinici, J. R. R. Mayer, and G. M. Cloutier, "Investigation of accuracy of aerostatic guideways," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 478-487, 2009.
- [13] I. 230-2, "Test Code for Machine Tools—Part 2: Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning of Numerically Controlled Axes," ed: International Organization for Standardization Geneva, 1997.
- [14] G. Chen, J. Yuan, and J. Ni, "A displacement measurement approach for machine geometric error assessment," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 149-161, 2001.
- [15] J. Muelaner, B. Yang, C. Davy, M. Verma, and P. Maropoulos, "Rapid machine tool verification," *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 431-438, 2014.
- [16] B. Bringmann and W. Knapp, "Model-based 'chase-the-ball' calibration of a 5-axes machining center," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 55, pp. 531-534, 2006.
- [17] A. N. S. Institute, *Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing*: American Society of Mechanical Engineers, 1986.
- [18] B. Bringmann, A. Küng, and W. Knapp, "A measuring artefact for true 3D machine testing and calibration," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 54, pp. 471-474, 2005.

- [19] G. Florussen and H. Spaan, "Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 536-539, 2012.
- [20] S. Weikert, "R-test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 429-432, 2004.
- [21] S. Postlethwaite, D. Ford, and D. Morton, "Dynamic calibration of CNC machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, pp. 287-294, 1997.
- [22] J. Miller, A. P. Longstaff, S. Parkinson, and S. Fletcher, "Improved machine tool linear axis calibration through continuous motion data capture," *Precision Engineering*, vol. 47, pp. 249-260, 2017.
- [23] H. Schwenke, R. Schmitt, P. Jatzkowski, and C. Warmann, "On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer," *CIRP annals*, vol. 58, pp. 477-480, 2009.
- [24] E. Hughes, A. Wilson, and G. Peggs, "Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 49, pp. 391-394, 2000.
- [25] N. Instruments. *En quoi consiste l'acquisition de données ?* Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/f/>
- [26] N. Instruments. (2016). *Principes fondamentaux des capteurs*. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4045/fr/>
- [27] N. Instruments. (2016). *Note d'application dédiée au DAQ*. Available: <http://www.ni.com/white-paper/12825/fr/>
- [28] L. Baron and L. Rolland, "An optimization post-processing module for complex tool-tip milling operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, pp. 615-624, 2015.
- [29] V. Calatoru, "MEC8550 - Fabrication assistée par ordinateur et machines outils," ed, Communication personnelle, octobre 2016.
- [30] Heidenhain. (2016). *Programme Général*. Available: http://asynoptim.com/wp-content/uploads/2017/07/programme_general_HEIDENHAIN.pdf
- [31] Renishaw. *Explication de l'interférométrie*. Available: <http://www.renishaw.fr/fr/explication-de-linterferometrie--7854>
- [32] J.-x. Chen, S.-w. Lin, X.-l. Zhou, and T.-q. Gu, "A ballbar test for measurement and identification the comprehensive error of tilt table," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 103, pp. 1-12, 2016.
- [33] W. Gao, S. Kim, H. Bosse, H. Haitjema, Y. Chen, X. Lu, *et al.*, "Measurement technologies for precision positioning," *CIRP Annals*, vol. 64, pp. 773-796, 2015.
- [34] S. Aguado, J. Santolaria, J. Aguilar, D. Samper, and J. Velazquez, "Improving the accuracy of a machine tool with three linear axes using a laser tracker as measurement system," *Procedia engineering*, vol. 132, pp. 756-763, 2015.
- [35] N. Instruments. (2012). *Comment choisir le bon matériel DAQ pour votre système de mesure*. Available: <http://www.ni.com/white-paper/13655/fr/>

- [36] N. Instruments. (2016). *NI cDAQ -9171/9174/9178 User Manual*. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372838e.pdf>
- [37] N. Instruments. *En quoi consiste LabVIEW ?* Available: <http://www.ni.com/fr-ca/shop/labview.html>
- [38] N. Instruments. (2014). *Cadencement matériel vs cadencement logiciel*. Available: <http://zone.ni.com/reference/fr-XX/help/370466AA-0114/mxcncpts/hardwresoftwretiming/>
- [39] N. Instruments. (2018). *DAQmx Timing and Sample Rates*. Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P7KdSAK>
- [40] N. Instruments. (2015). *Arm Start Trigger*. Available: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370466AC-01/mxcncpts/armtrig/>
- [41] Heidenhain. *IBV 6000 Series Specifications*. Available: https://www.heidenhain.com/en_US/products/subsequent-electronics/interface-electronics/ibv-6000-series/
- [42] N. Instruments. (2012). *Comment choisir le bon bus pour votre système de mesure*. Available: <http://www.ni.com/white-paper/9401/fr/>
- [43] N. Instruments. *Systèmes CompactDAQ*. Available: <http://www.ni.com/fr-ca/shop/compactdaq.html>
- [44] N. Instruments. *Systèmes PXI*. Available: <http://www.ni.com/fr-ca/shop/pxi.html>
- [45] Y. Belgnaoui. (2008). *Les générateurs de signaux arbitraires*. Available: <http://www.mesures.com/pdf/old/810-GA-Generateur-arbitraire.pdf>
- [46] N. Instruments. (2016). *Mesures d'encodeur : Guide pratique*. Available: <http://www.ni.com/tutorial/7109/fr/>

ANNEXE B – ETUDE POUR DEFINIR LES BESOINS POUR LE MATERIEL D’ACQUISITION NECESSAIRE

Cette étude pour définir nos besoins pour le matériel d’acquisition adéquat est basée sur quatre critères : le nombre d’entrées/sorties, la fréquence d’échantillonnage, la résolution, le type de communication avec l’ordinateur :

Les entrées/sorties : il est primordial d’identifier les besoins en termes de nombre et de type d’entrées et de sorties du matériel requises pour notre application. Dans notre cas, selon l’architecture du système fixée précédemment et illustrée par la figure 3.2, nous n’avons pas besoin de sorties. La seule sortie requise est la liaison assurant la communication avec l’ordinateur.

Quant aux entrées, elles sont deux : une en provenance de chaque capteur, (l’encodeur de la machine et l’interféromètre). Ces deux entrées sont similaires. Elles se composent, chacune, de deux signaux carrés A et B en quadrature de phase (déphasés de 90°). Ainsi nous avons besoins de deux entrées de types “compteurs d’encodeur” capables de faire l’acquisition des signaux des capteurs (encodeurs).

La fréquence d’échantillonnage : Elle est très importante puisqu’elle représente la vitesse d’acquisition. C’est-à-dire la vitesse à laquelle le matériel relève les échantillons des signaux reçus. La fréquence d’échantillonnage requise dépend de la fréquence maximale que peut atteindre le signal à mesurer. En effet, d’après le théorème de Nyquist la fréquence d’échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence maximale du signal reçu pour en avoir une acquisition efficace et une représentation fidèle.

Dans notre cas, nous avons deux entrées, avec deux signaux en quadrature de phase. Les deux signaux de chaque capteur ont la même fréquence. En ce qui concerne les signaux de l’encodeur de la machine, Nous savons qu’une période du signal de sortie correspond à un déplacement de 20 μm . C’est sa résolution de mesure. Donc la fréquence maximale que peut atteindre le signal émanant de cet encodeur peut être déterminée grâce à la vitesse maximale que peut atteindre la machine et qui correspond au déplacement mesuré.

Plus concrètement :

$$F_{Max} = \frac{V_{Max}}{r \times 60}$$

Avec :

F_{Max} : La fréquence Maximale du signal en Hz.

r : La résolution qui correspond au déplacement mesuré pour une période du signal.

60 : pour la conversion des minutes en secondes

Or la vitesse maximale V_{Max} vaut 10m/min dans notre cas et la résolution $r=20\text{ }\mu\text{m}$.

Ainsi, $F_{Max}= 8.333\text{ kHz}$

Or, grâce à l'interpolation effectuée par les interfaces électroniques IBV, la fréquence de ces signaux se voit multipliée par 10 pour atteindre la valeur de $F_{Max}= 83.33\text{ kHz}$.

Quant aux signaux en provenance de l'interféromètre, Nous utilisons la même formule pour déterminer leur fréquence maximale en se basant sur la résolution de mesure et la vitesse maximale que peut atteindre la machine.

Comme mentionné précédemment, la résolution de mesure de l'interféromètre correspond à la moitié de la longueur d'onde du laser. Or, la valeur de cette longueur d'onde n'est pas toujours la même, elle dépend de plusieurs facteurs. Par conséquent nous effectuons une majoration pour palier à cet inconvénient. Mais vue que la fréquence est inversement proportionnelle à la période donc c'est une "minoration" que nous effectuons sur la valeur de la longueur d'onde et par conséquent sur la période.

Habituellement, la valeur de la longueur d'onde se situe aux alentours de 633nm. Donc pour les calculs nous considérons une valeur de 632nm et une vitesse maximale que peut atteindre la machine qui vaut 10m/min. Ce qui donnerait Ainsi, $F_{Max}= 527.426\text{ kHz}$.

Donc, d'après le théorème de Nyquist, nous avons besoins d'un matériel capable de réaliser une acquisition à une fréquence pouvant atteindre le double de F_{Max} c'est-à-dire une valeur de 1.054852 MHz.

La résolution verticale : Est définit par le plus petit changement détectable par le matériel d'acquisition. Ce critère est très important lors de l'acquisition de signaux analogiques. Néanmoins il ne l'est pas autant dans notre cas vu que les signaux de nos capteurs sont carrés avec une amplitude qui peut prendre uniquement deux valeurs 0 ou 1V pour l'encodeur de la machine et 0 ou 5V pour l'interféromètre. Par conséquent nous ne considérons pas ce critère.

Le type de communication [42]: Il existe plusieurs types de communication entre le matériel d'acquisition et l'ordinateur. Cette communication repose sur une connexion via un emplacement ou un port de l'ordinateur ou même sans fil (wifi). Les bus de communication les plus connus sont : PCI, PCI Express, PXI, PXI Express, USB, ethernet et sans fil.

Pour pouvoir déterminer quel type de communication répondrait correctement à nos besoins, nous nous reposons sur cinq critères :

1- La bande passante du bus : Elle correspond à la quantité de données maximale que peut transférer le bus en continue pendant un intervalle de temps définie. Elle s'exprime en Mégaoctets par seconde (Mo/s). C'est un critère primordial lors de mesures en dynamique comme dans notre cas. Il est possible de calculer la bande passante minimale requise pour le transfert de certaines données acquises. Ce calcul est obtenu en multipliant trois éléments : le nombre d'octets maximum que peut contenir un échantillon (arrondi à l'octet supérieur), la vitesse d'échantillonnage et le nombre de voies.

Dans notre cas l'échantillon le plus volumineux contiendrait 5 octets donc en arrondissant nous considérons 6 octets, la vitesse d'échantillonnage maximale est de 1.1Mhz et nous avons deux voies. Ainsi le calcul donne : $6 \text{ octets/ech} \times 1.1 \text{ Mhz/s} \times 2 \text{ voies} = 13.2 \text{ Mo/s}$

Donc nous avons besoin d'une bande passante de 13.2 Mo/s au minimum.

2- La synchronisation entre plusieurs matériels : Pour le bon choix du bus de communication nous devons déterminer si nous avons besoins de synchroniser plusieurs matériels, vue que certains bus offrent une meilleure synchronisation que d'autres.

A première vue, il semblerait que ce critère est très important dans notre cas vue que la synchronisation est une contrainte majeure pour l'aboutissement du projet. Mais ce que nous cherchons à synchroniser sont les mesures prises par un seul matériel et non pas plusieurs matériels d'acquisition. En effet, la synchronisation des mesures est beaucoup plus simple au sein d'un même matériel. L'utilisation de plusieurs de ces matériels ne ferait que compliquer notre tâche. Ainsi nous choisissons d'utiliser un seul matériel d'acquisition et par conséquent de négliger ce critère.

3- La portabilité : Ce n'est pas un critère très important dans notre cas puisque notre application est destinée à une machine en particulier. Cela n'exclue pas la possibilité de l'utiliser pour d'autre machines mais cela se limite à celles du laboratoire LRFV. Donc la portabilité n'est pas essentielle pour nous.

4- La distance entre les mesures et l'ordinateur : Cette distance peut constituer une contrainte pour le choix du bus surtout dans le cas où elle est très élevée. Or ceci n'est pas notre cas vu que l'ordinateur sera à proximité de l'endroit de prise des mesures. Donc, en ce qui nous concerne, c'est un facteur à négliger.

5 Les entrées/sorties point à point : Ce critère concerne la réactivité des entrées/sorties qui est causée par la latence du bus. Cette latence correspond au retard qui peut se produire entre l'envoi de la commande de lecture ou d'écriture aux entrées/sorties et leur réponse à cette commande. En d'autres termes, c'est la vitesse de mise à jour de la valeur réelle des entrées/sorties.

Ce critère englobe non seulement la latence du bus à choisir, mais aussi son déterminisme qui correspond à l'aptitude du bus à garder une latence constante en tout temps. Plus la latence du bus est constante au cours du temps et plus il est déterministe et meilleur.

Nous cherchons à réaliser une acquisition à fréquence assez élevée (1.1MHz) donc ce critère est assez important pour nous.

Un classement des bus de communication est présenté par le Tableau 8.1 élaboré par National Instrument comme guide pour le choix du bus en fonction des cinq critères précédents.

Tableau 8.1 : Classement des bus de communication selon NI [42]

Bus	Bande passante	E/S point à point	synchronisation	Portabilité	Distance
<u>PCI</u>	132 Mo/s (partagés)	Excellente	Meilleure	Bonne	Bonne
<u>PCI Express</u>	250 Mo/s (par ligne)	Excellente	Meilleure	Bonne	Bonne
<u>PXI</u>	132 Mo/s (partagés)	Excellente	Excellente	Meilleure	Meilleure
<u>PXI Express</u>	250 Mo/s (par ligne)	Excellente	Excellente	Meilleure	Meilleure
<u>USB</u>	60 Mo/s	Meilleure	Bonne	Excellente	Meilleure
<u>Ethernet</u>	125 Mo/s (partagés)	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente
<u>Sans fil</u>	6,75 Mo/s (par voie 802.11g)	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente
<u>Besoins</u>	13.2Mo/s	Meilleure	Bonne	Bonne	Bonnes

Les valeurs indiquées dans le Tableau 8.1 en rouge sont celles qui ne répondent pas à nos besoins par conséquent le critère en question est éliminé. Ainsi nous éliminons le bus Ethernet pour sa latence insuffisante et le bus sans fil pour le même critère ainsi que sa bande passante trop faible.

En conclusion, tous les bus présentés dans le Tableau 8.1 sont valables sauf l'éthernet et le sans-fil.

ANNEXE C – ETUDE COMPARATIVE DES CATEGORIES DE MATERIELS D'ACQUISITION DE NI

Il existe trois catégories de matériels d'acquisition offertes par National Instruments :

- 1- Les PCI : sont des cartes d'acquisition de données. Elles tiennent leur nom du type de communication avec l'ordinateur. En effet, ces cartes sont installées dans un emplacement appelé PCI existant sur la carte mère d'un ordinateur bureautique. (<http://www.ni.com/fr-ca/support/model.pci-6221.html> consulté le 13 Février 2018)
- 2- Les CompactDAQ [43] : sont des systèmes d'acquisition modulaires. Ils sont composés d'un châssis sur lequel existe un contrôleur intégré. Ce châssis comporte un certain nombre d'emplacement destinés à accueillir des modules selon les besoins de l'utilisateur. Une large panoplie de modules existe et chacun réalise une fonction qui le différencie des autres : E/S, Numériques ou Analogiques, courant ou Tension, compteurs/timers, communication ... Le système compactDAQ est relié à l'ordinateur soit par USB, soit par Ethernet ou par Connexion Sans fil.
- 3- Les PXI [44] : comme les CompactDAQ, ce sont des plateformes modulaires composées d'un châssis et plusieurs modules assurant, chacun, une fonction différente. Les PXI comporte généralement un ordinateur intégré sur lequel est relié l'écran et tout autre périphérique nécessaire (souris, clavier ...) Donc, un ordinateur supplémentaire n'est pas requis.

Les PXI, comme leur nom l'indique, utilisent le bus PXI pour communiquer. Il existe aussi les PXIe qui est une variante du PXI utilisant le bus PXI Express pour communiquer.

Toutes ces catégories sont aptes à répondre à nos besoins il suffirait de bien dimensionner le système et choisir les composants appropriés. Néanmoins, ces catégories diffèrent les unes des autres. Chacune a des avantages et des inconvénients que nous avons récapitulé dans le Tableau 8.2.

Tableau 8.2: Avantages et inconvénients de chaque catégorie de Matériels d'acquisitions disponibles

Catégorie	Avantages	Inconvénients
PCI	Peu coûteux Dimensionnement plus simple	Nécessite un ordinateur bureautique Entretien et maintenance plus complexe (non modulaire)
CompactDAQ USB	Portabilité Moins encombrant Utilisable avec un laptop	Technologie de Bus (USB) limitée
PXI	Meilleure technologie de Bus (PXI) Ordinateur non requis	Très coûteux

ANNEXE D - ETUDES COMPARATIVES POUR ACHAT DE GENERATEUR DE TENSIONS

Généralement, le fonctionnement d'un générateur de signaux est similaire au fonctionnement d'un oscilloscope ou même d'un matériel d'acquisition mais dans le sens inverse. En effet, le générateur crée le signal numériquement, le stocke dans sa mémoire puis le convertit en un signal analogique. [45]

D'où la présence des deux critères de choix : la résolution et la fréquence d'échantillonnage pour le choix du générateur et rencontrés aussi précédemment lors du choix du matériel d'acquisition. Tous les modèles considérés ont bien deux chaînes indépendantes, un port USB et permettent une tension d'offset de 10V.

En se basant sur le Tableau 8.3, et en procédant par élimination, le choix se limite à deux modèles : le AFG1022 de Tektronix et le 33510B de Keysight puisque tous les autres modèles ont une amplitude maximale limitée à 3V sur l'une de leurs chaînes. Bien que le 33510B de Keysight a des performances plus élevées en termes de fréquence du signal carré, de fréquence d'échantillonnage et de résolution verticale, nous optons pour le AFG1022 de Tektronix vu qu'il couvre largement nos besoins et que son prix est bien plus raisonnable.

Tableau 8.3 : Étude comparative des générateurs de tensions considérés

Modèle	Fréquence du Signal carré	Amplitude	Prix Approximatif	Fréquence d'échantillonnage	Résolution verticale
Tektronix AFG1022	1 μ Hz à 12,5 MHz	1 mVpp à 10 Vpp	1144.05 CAD	125Méch/s	14 bits
Keysight 33510B (Agilent)	1 μ Hz à 20 MHz	1 mVpp à 10 Vpp	3417.00 CAD	160Méch/s	16 bits
LeCroy WaveStation 2012	1 μ Hz à 10 MHz	CH1 : 2 mVpp à 3 Vpp CH2 : 2 mVpp à 10 Vpp (≤ 10 MHz) 2 mVpp à 5 Vpp (>10 MHz)	975.58 CAD	125 Méch/s	14 bit
BK4052	1 μ Hz à 5 MHz	CH1 : 2 mVpp à 10 Vpp (≤ 10 MHz) 2 mVpp à 5 Vpp (>10 MHz) CH2 : 2 mVpp à 3 Vpp	736.88 CAD	125 Méch/s	14 bit
rigol dg1022	1 μ Hz à 5 MHz	CH1 : 2mVpp à 10 Vpp CH2 : 2mVpp à 3Vpp	450 €	100 Méch/s	CH1 : 14 bit CH2 : 10 bit
METRIX GX1025	1 μ Hz à 25 MHz	CH1 : 2mVpp à 10Vpp CH2 : 2mVpp à 3Vpp	615.29 €	125 Méch/s	14 bit

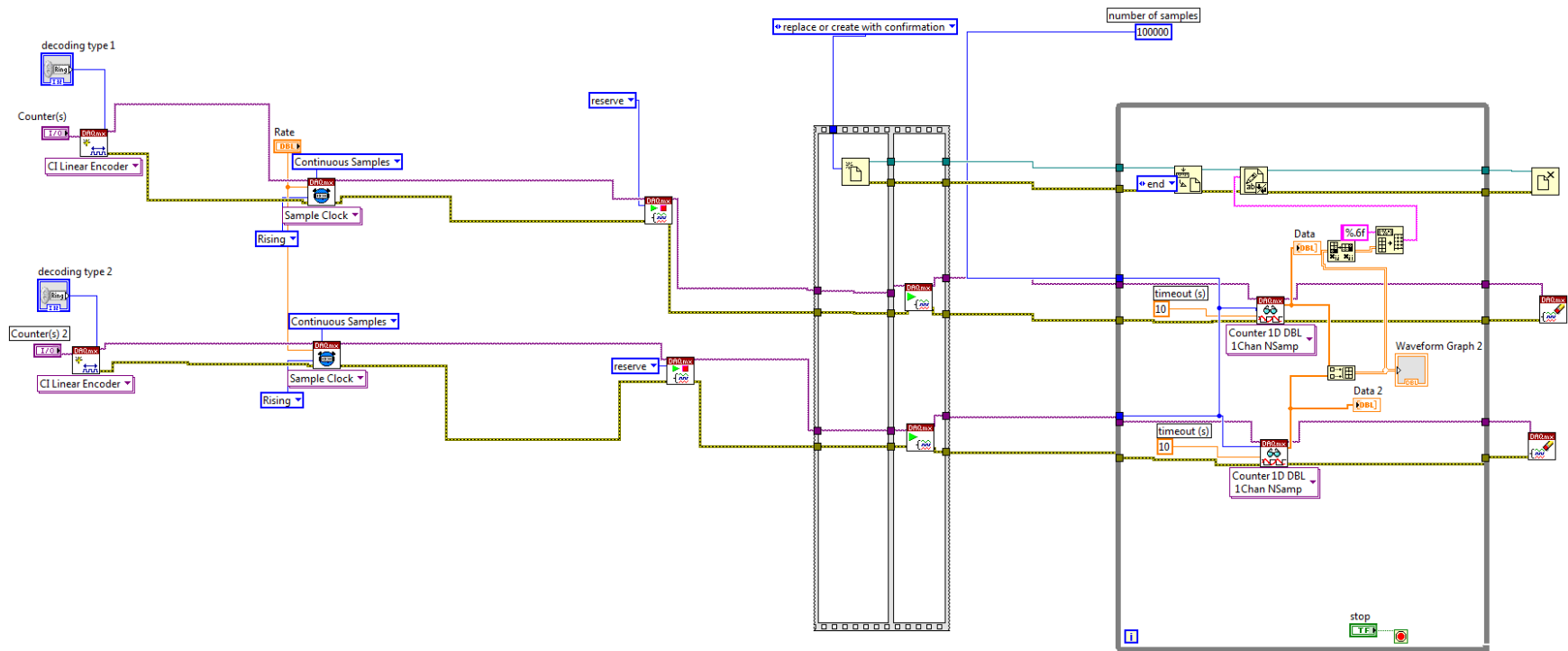
ANNEXE E – BROCHAGE DES COMPTEURS DE NOTRE MATÉRIEL D'ACQUISITION[46]

Terminaux compteurs NI-DAQmx par défaut

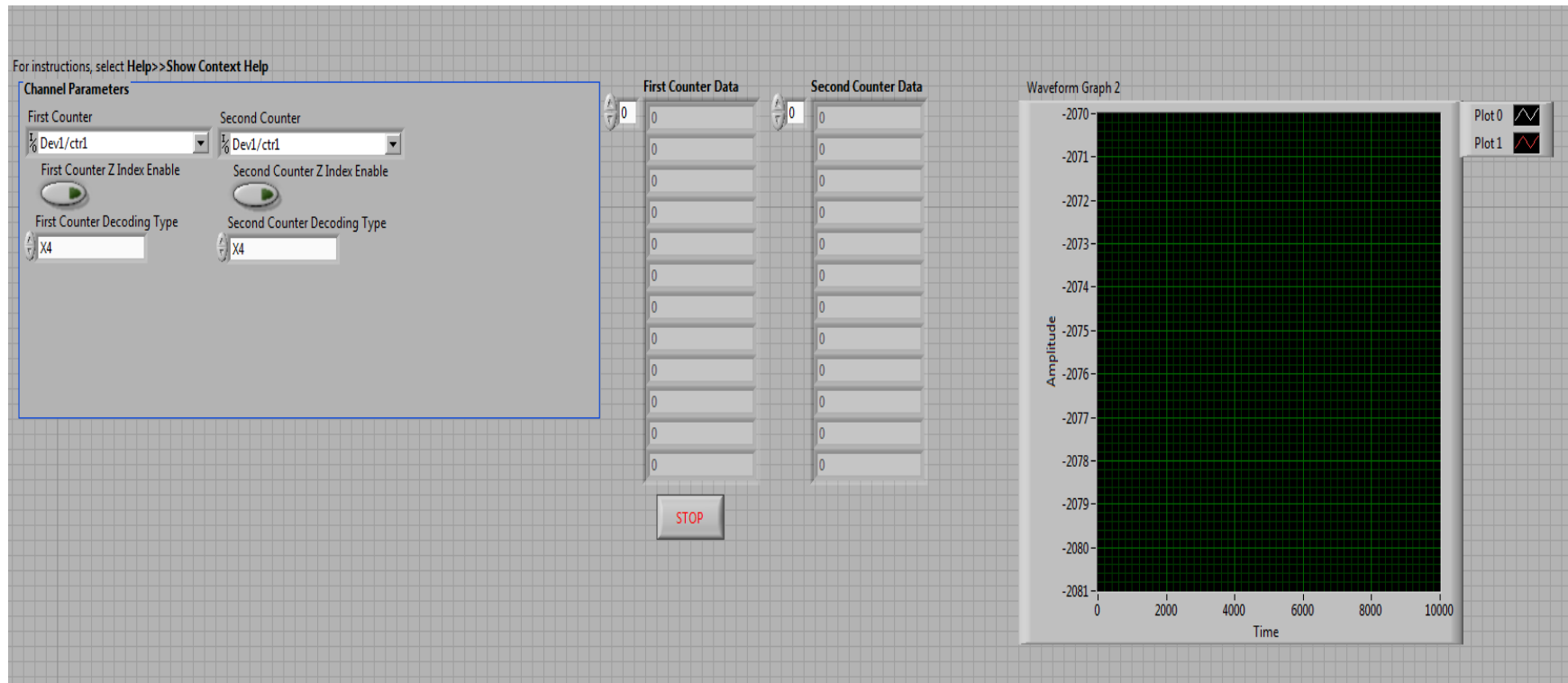
Signal de compteur/timer	Numéro de broche par défaut	Nom du signal
CTR 0 SRC	14	PFI 0
CTR 0 GATE	16	PFI 1
CTR 0 AUX	17	PFI 2
CTR 0 OUT	19	PFI 3
CTR 0 A	14	PFI 0
CTR 0 Z	16	PFI 1
CTR 0 B	17	PFI 2
CTR 1 SRC	20	PFI 4
CTR 1 GATE	22	PFI 5
CTR 1 AUX	23	PFI 6
CTR 1 OUT	25	PFI 7
CTR 1 A	20	PFI 4
CTR 1 Z	22	PFI 5
CTR 1 B	23	PFI 6
CTR 2 SRC	19	PFI 3
CTR 2 GATE	17	PFI 2
CTR 2 AUX	14	PFI 0
CTR 2 OUT	16	PFI 1
CTR 2 A	19	PFI 3
CTR 2 Z	17	PFI 2
CTR 2 B	14	PFI 0
CTR 3 SRC	25	PFI 7
CTR 3 GATE	23	PFI 6
CTR 3 AUX	20	PFI 4
CTR 3 OUT	22	PFI 5
CTR 3 A	25	PFI 7
CTR 3 Z	23	PFI 6
CTR 3 B	20	PFI 4
FREQ OUT	17	PFI 2

Chaque compteur CTR dispose de sept broches allouées chacune à un signal différent pouvant servir pour diverses applications mettant en jeu ce compteur. Dans notre cas nous n'avons besoin que des deux signaux A et B de deux compteurs. Le reste des signaux présentés ont des fonctions qui varient d'une application à une autre.

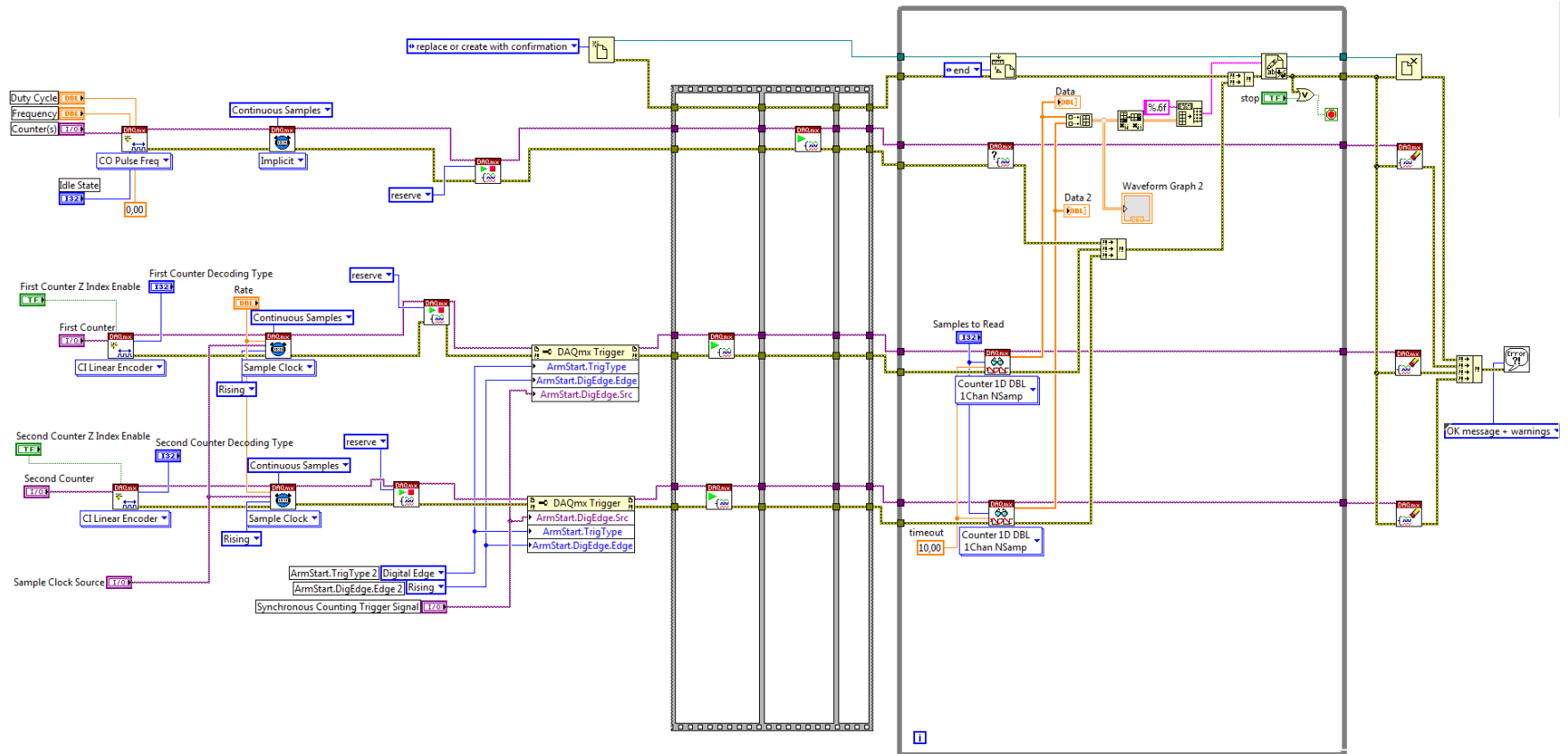
ANNEXE F - PREMIERE VERSION DU PROGRAMME D'ACQUISITION



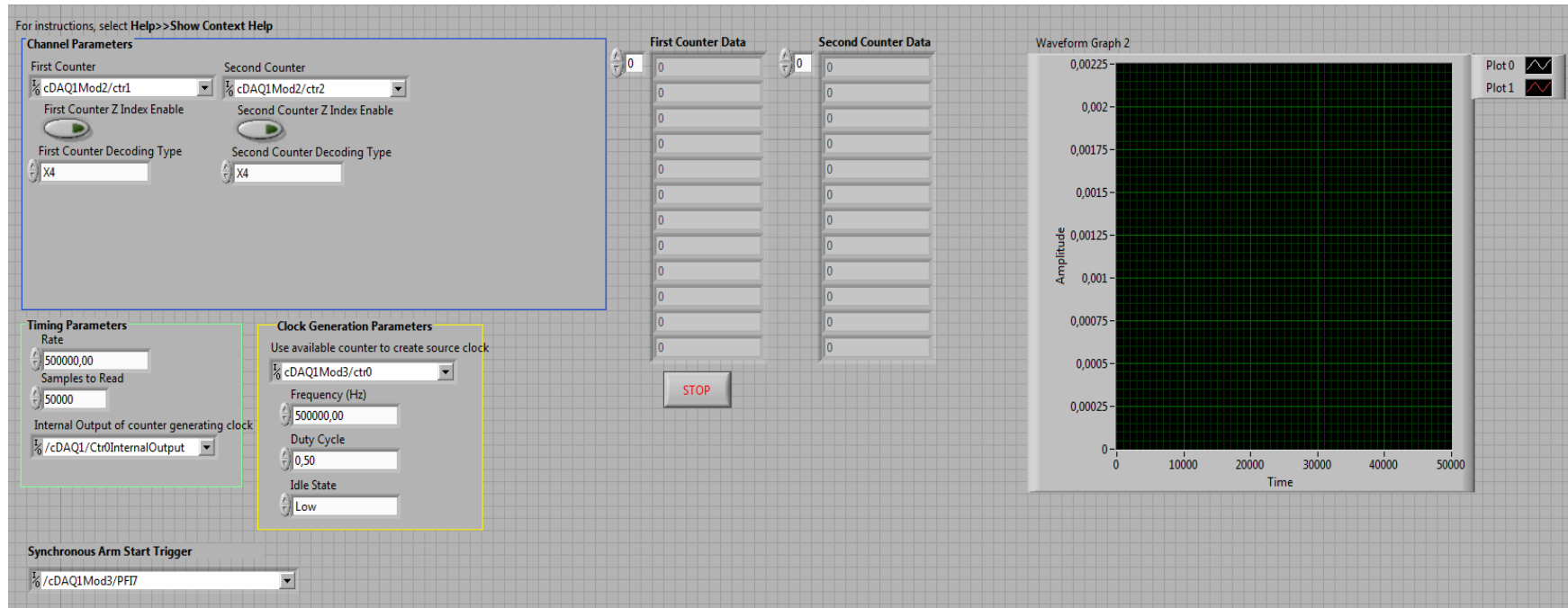
ANNEXE G - PREMIERE VERSION DE L'INTERFACE DE SUPERVISION



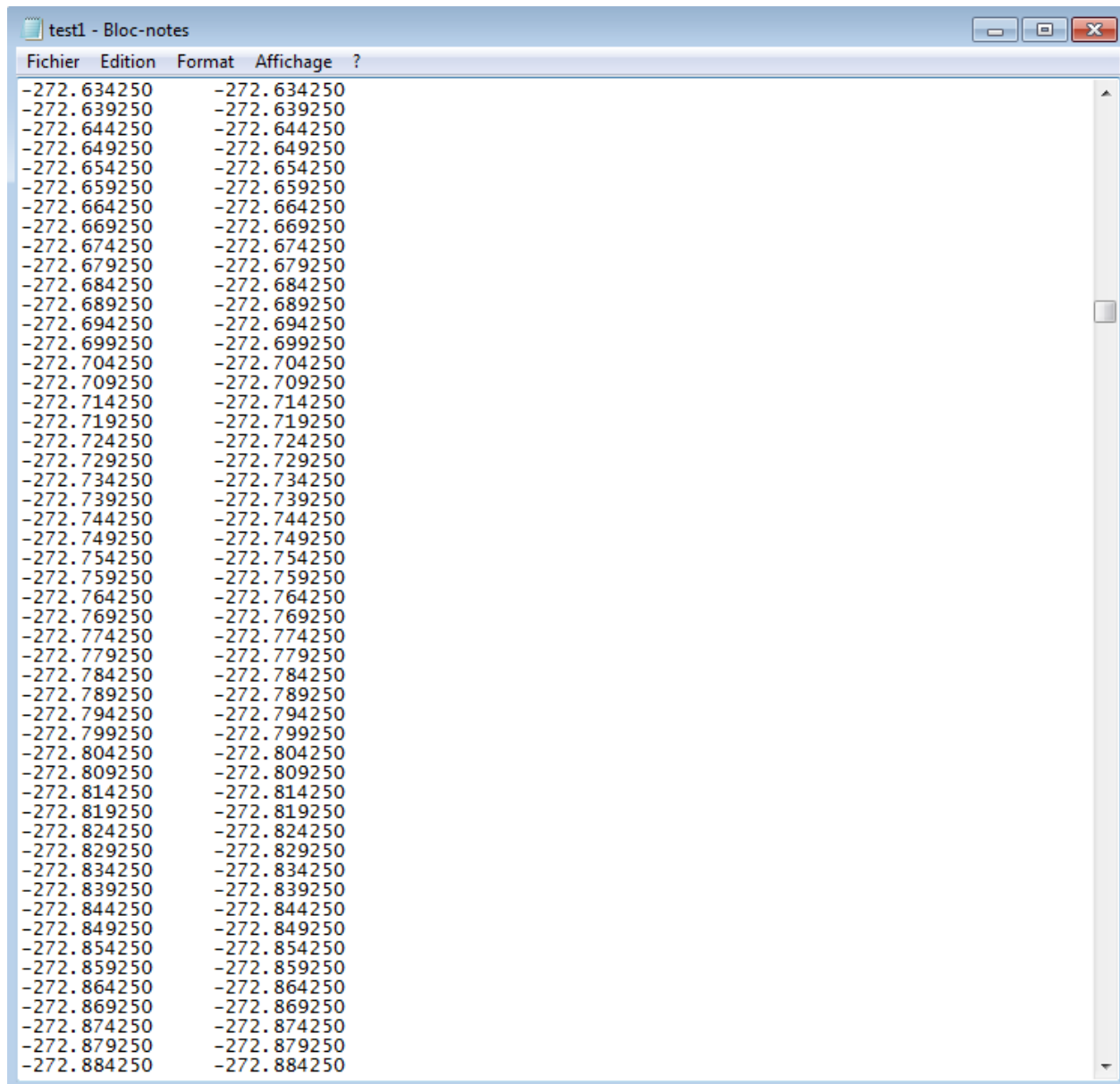
ANNEXE H - VERSION FINALE DU PROGRAMME D'ACQUISITION



ANNEXE I - VERSION FINALE DE L'INTERFACE DE SUPERVISION

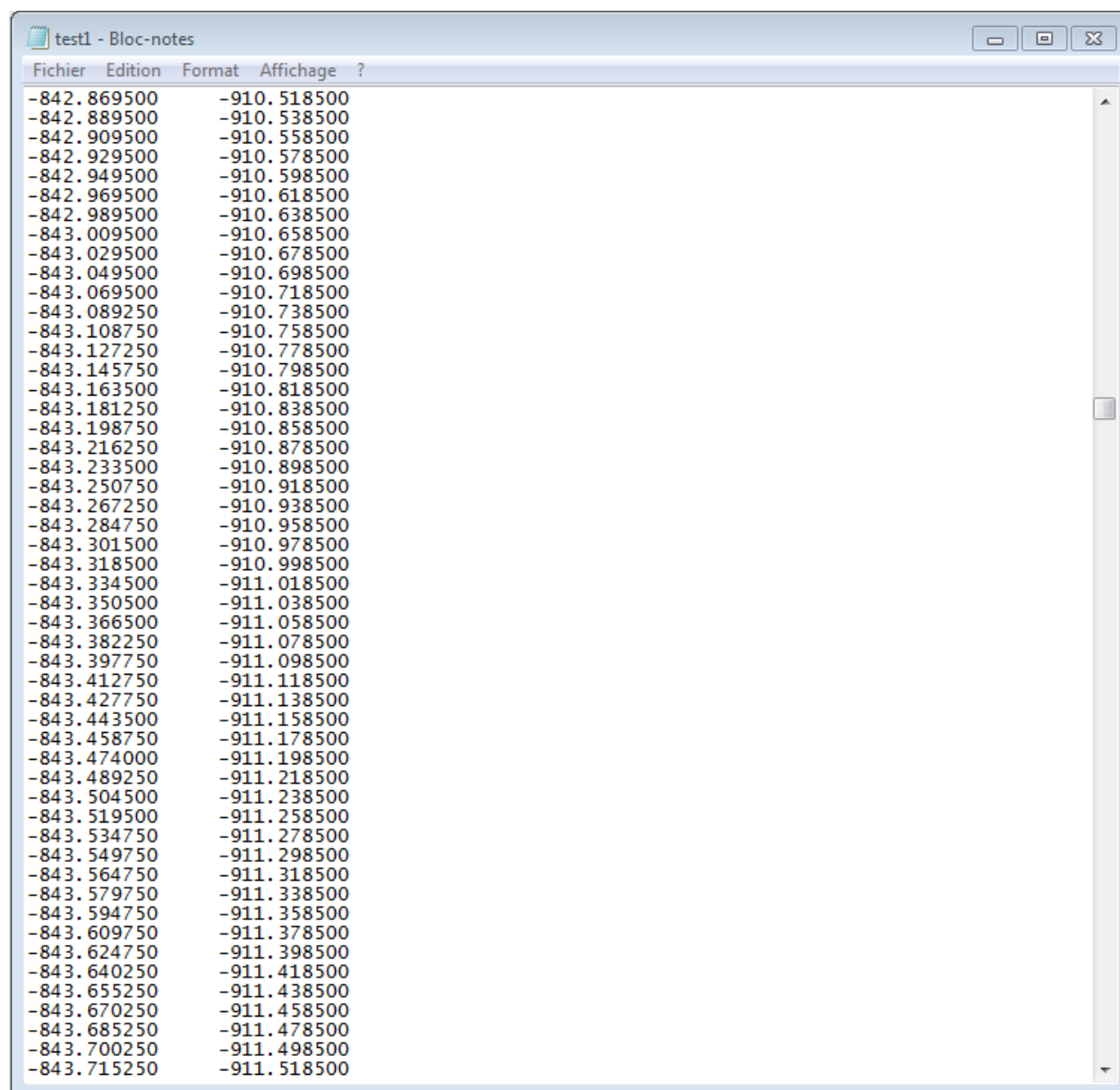


ANNEXE J - EXEMPLE D'UN FICHIER RESULTAT OBTENU AVEC LA VERSION FINALE DU PROGRAMME D'ACQUISITION



The image shows a screenshot of a Notepad window titled "test1 - Bloc-notes". The window contains a list of numerical data organized into two columns. The data consists of 40 rows, each containing two values: a negative decimal number followed by "250". The values in the first column range from -272.634250 to -272.884250 in increments of 0.001. The values in the second column range from -272.634250 to -272.884250 in increments of 0.002. The window has a menu bar with "Fichier", "Edition", "Format", "Affichage", and "?". The right side of the window shows standard window controls (minimize, maximize, close) and a vertical scrollbar.

Fichier	Edition	Format	Affichage	?
-272.634250	-272.634250			
-272.639250	-272.639250			
-272.644250	-272.644250			
-272.649250	-272.649250			
-272.654250	-272.654250			
-272.659250	-272.659250			
-272.664250	-272.664250			
-272.669250	-272.669250			
-272.674250	-272.674250			
-272.679250	-272.679250			
-272.684250	-272.684250			
-272.689250	-272.689250			
-272.694250	-272.694250			
-272.699250	-272.699250			
-272.704250	-272.704250			
-272.709250	-272.709250			
-272.714250	-272.714250			
-272.719250	-272.719250			
-272.724250	-272.724250			
-272.729250	-272.729250			
-272.734250	-272.734250			
-272.739250	-272.739250			
-272.744250	-272.744250			
-272.749250	-272.749250			
-272.754250	-272.754250			
-272.759250	-272.759250			
-272.764250	-272.764250			
-272.769250	-272.769250			
-272.774250	-272.774250			
-272.779250	-272.779250			
-272.784250	-272.784250			
-272.789250	-272.789250			
-272.794250	-272.794250			
-272.799250	-272.799250			
-272.804250	-272.804250			
-272.809250	-272.809250			
-272.814250	-272.814250			
-272.819250	-272.819250			
-272.824250	-272.824250			
-272.829250	-272.829250			
-272.834250	-272.834250			
-272.839250	-272.839250			
-272.844250	-272.844250			
-272.849250	-272.849250			
-272.854250	-272.854250			
-272.859250	-272.859250			
-272.864250	-272.864250			
-272.869250	-272.869250			
-272.874250	-272.874250			
-272.879250	-272.879250			
-272.884250	-272.884250			

ANNEXE K – EXEMPLE D’UN FICHIER RESULTAT NON SYNCHRONISÉ

-842.869500	-910.518500
-842.889500	-910.538500
-842.909500	-910.558500
-842.929500	-910.578500
-842.949500	-910.598500
-842.969500	-910.618500
-842.989500	-910.638500
-843.009500	-910.658500
-843.029500	-910.678500
-843.049500	-910.698500
-843.069500	-910.718500
-843.089250	-910.738500
-843.108750	-910.758500
-843.127250	-910.778500
-843.145750	-910.798500
-843.163500	-910.818500
-843.181250	-910.838500
-843.198750	-910.858500
-843.216250	-910.878500
-843.233500	-910.898500
-843.250750	-910.918500
-843.267250	-910.938500
-843.284750	-910.958500
-843.301500	-910.978500
-843.318500	-910.998500
-843.334500	-911.018500
-843.350500	-911.038500
-843.366500	-911.058500
-843.382250	-911.078500
-843.397750	-911.098500
-843.412750	-911.118500
-843.427750	-911.138500
-843.443500	-911.158500
-843.458750	-911.178500
-843.474000	-911.198500
-843.489250	-911.218500
-843.504500	-911.238500
-843.519500	-911.258500
-843.534750	-911.278500
-843.549750	-911.298500
-843.564750	-911.318500
-843.579750	-911.338500
-843.594750	-911.358500
-843.609750	-911.378500
-843.624750	-911.398500
-843.640250	-911.418500
-843.655250	-911.438500
-843.670250	-911.458500
-843.685250	-911.478500
-843.700250	-911.498500
-843.715250	-911.518500

ANNEXE L – RÉSULTATS DES TESTS DE CONFIRMATION DE L'EXACTITUDE DE NOS MESURES

Consigne (mm)	erreur NI (μm)	erreur NI arrondie (μm)	erreur Renishaw (μm)	NI Arrondie- Renishaw (μm)
0	0,00000	0	0	0
-100	1,79922	1,8	1,8	0
-200	-0,67309	-0,7	-0,7	0
-300	-1,08874	-1,1	-1,1	0
-400	2,13432	2,1	2,1	0
-500	4,48725	4,5	4,5	0
-600	3,67609	3,7	3,7	0
-700	3,18134	3,2	3,2	0
-700	3,33954	3,3	3,3	0
-600	3,51789	3,5	3,5	0
-500	4,64546	4,6	4,6	0
-400	2,37162	2,4	2,4	0
-300	-1,16784	-1,2	-1,2	0
-200	-0,98950	-1	-1	0
-100	1,40371	1,4	1,4	0
0	0,00000	0	0	0